

LEHRSTUHL FÜR BAUKONSTRUKTIONSLEHRE UND HOLZBAU  
DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG

o. Prof. Dr.-Ing. Heinrich Paschen

Voruntersuchungen zum  
Verbundverhalten von Betonstählen bei Kurzzeit-  
beanspruchung

Bericht erstattet

von

Dr.-Ing. Joachim Steinert

1970

Die Untersuchungen wurden im Auftrag und mit Unterstützung des Herrn Bundesminister für Städtebau und Wohnungswesen durchgeführt. Ein Teil der für die Messungen verwendeten Geräte sind Leihgaben der Deutschen Forschungsgemeinschaft, Bad Godesberg.

Az.: II A 9 - 81 07 05-135

Im Rahmen eines mehrjährigen Forschungsauftrages zur Ausarbeitung von Bemessungs-Grundlagen von Stahlbetonbauteilen in Schutzbauten ist im ersten Abschnitt geplant, das Verbundverhalten von Betonstählen in Ausziehkörpern unter Kurzzeitbeanspruchung zu untersuchen. Mit der Kurzzeitbeanspruchung soll die Waffeneinwirkung auf Stahlbeton-Bauwerke bzw. -Bauteile simuliert werden. Die Beanspruchungsfunktion muß daher bestimmten Anforderungen hinsichtlich Belastungsgröße, Druck- oder Kraft amplitude, Belastungsdauer und vor allem Belastungsverlauf mit der Zeit (Rechteckstoß, Dreieckstoß oder Exponentialstoß) genügen. Kurzzeitige Beanspruchungen großer Lastamplitude werden üblicherweise im Sprengversuch oder mit dem Pendelhammer erzeugt. Beide Methoden kommen für Grundlagenuntersuchungen nicht in Frage: Mit dem Sprengversuch läßt sich zwar eine wirklichkeitsnahe Belastung erzeugen, jedoch wird die Vor- ausbestimmbarkeit der Wirkung und ihre Reproduzierbarkeit für die Her- leitung gesetzmäßiger Zusammenhänge zwischen Last und Verformung als un- zureichend angesehen. Beide genannten Nachteile sind bei einer Fallhammer- anlage nicht vorhanden, aber auch hiermit ist eine steuerbare Beeinflus- sung der Kraft-Zeit-Funktion nicht möglich.

Aus diesen Gründen wurde für die geplanten Grundlagenversuche zum Verbund- verhalten impulsbeanspruchter Betonstähle eine servohydraulisch gesteuerte Prüfmaschine als Belastungseinrichtung vorgesehen. Bei derartigen Anlagen wird die Beanspruchungsfunktion durch ein elektrisches Signal (Sollwert) vorgegeben und mit einer Hydraulik wahlweise in Kräfte oder in Verformungen umgesetzt. Die erzeugte Wirkung, Kraft oder Verformung, wird gemessen (Ist- wert) und mit den vorgegebenen Werten verglichen, s. Anlage 1. Ein Regel- verstärker sorgt dafür, daß innerhalb der Grenzen der Anlage die Differenz zwischen Sollwert und Istwert ein Minimum bleibt. Mit derartigen Anlagen lassen sich wahlweise Kräfte bis 100 Mp, Belastungsgeschwindigkeiten bis 5000 Mp/s, Verformungen bis 250 mm und minimale Anstiegszeiten bis 3 ms erzeugen, wobei die Belastungsfunktion einen völlig beliebigen Verlauf,

z. B. stochastisches Signal, besitzen darf.

Im Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig ist eine derartige Prüfmaschine vorhanden (Hydropulsanlage der Fa. Schenck, Darmstadt), die jedoch im ursprünglichen Ausbauzustand nur für eine Maximalkraft von  $\pm 1$  Mp ausgelegt ist. Eine Abschätzung ergab, daß die Anlage für die geplanten Untersuchungen mit einem Prüfzylinder für  $\pm 25$  Mp - bei einer Anstiegszeit von 10 ms - ausgerüstet werden mußte. Aufgrund dieser kostspieligen Erweiterung wurde vorab mit dem vorhandenen Prüfzylinder untersucht, ob die Anlage prinzipiell für die Durchführung der geplanten Untersuchungen geeignet ist. Dieser Eignungsnachweis sollte durch mindestens 20 Ausziehversuche bei Kurzzeitbeanspruchung erbracht werden. Der vorliegende Bericht hat die Durchführung dieser Untersuchungen und ihre Ergebnisse zum Gegenstand.

#### 1. Umfang und Durchführung der Untersuchungen

Die Untersuchungen des Verbundverhaltens von Betonstählen im Rahmen der Erprobung der in Aussicht genommenen Hydropulsanlage konnte zunächst nur an baupraktisch relativ unwichtigen Versuchskörpern vorgenommen werden. Die maximale Prüfkraft von  $\pm 1$  Mp bei den ursprünglich vorhandenen Prüfzylindern machte es nämlich erforderlich, die Verbundlängen und die Durchmesser der zu prüfenden Bewehrungsstäbe zu begrenzen. Vereinbarungsgemäß sollten mindestens 20 Ausziehversuche durchgeführt werden; daher wurden 12 Versuchskörper mit glattem und 16 Körper mit geripptem Stahl hergestellt.

Nach Rehm<sup>1)</sup> gilt für die bezogene Scherspannung - bei statischer Beanspruchung:

$$x_s = \frac{\sigma_s}{F_s} = \frac{P/F_s}{W} = \frac{P}{W \cdot \pi D l_v}, \text{ wobei}$$

für gerippten Stahl (s. Lit. Bild 29)  $x_s \approx 0,6$  zu erwarten ist - bei einer Rippenhöhe von  $a = 0,3$  mm und einem Rippenabstand von  $c = 5,0$  mm - hingegen gilt für Rundstahl (s. Lit. Bild 46)  $x_s \approx 0,1 \dots 0,14$ .

---

1) Rehm, G.: Über die Grundlagen des Verbundes zwischen Stahl und Beton, Heft 138 des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Berlin 1961.

Dabei bedeutet:

P	Last
W	Würfeldruckfestigkeit
F <sub>S</sub>	Scherfläche, $F_S = \pi \cdot D \cdot l_V$
D	Stab-Aussendurchmesser
l <sub>V</sub>	Verbundlänge

Die Verbundfestigkeit kann bei Rundstahl vermutlich auf die Klemmwirkung einzelner, bei geringen Lasten bereits abgescherter und den Scherwiderstand anderer noch nicht abgescherter Mörtelteile zurückgeführt werden. Im wesentlichen besteht bei Rundstahl gegen das Ausziehen jedoch nur ein Gleitwiderstand (= Verbundfestigkeit bei Rundstahl):  $\tau_G = \sigma_s$ . Für Rippenstähle hat Rehm vorgeschlagen, die Lastanteile der Rippe (Pressungen) und der übrigen Oberfläche (Scherung) ebenfalls zusammenzufassen und die sich so ergebene ideelle Spannung als Verbundspannung  $\tau_V$  zu bezeichnen.

Für die Tragfähigkeit der Versuchskörper mit Rundstahl vom gewählten Durchmesser 10 mm war daher für  $W = 330 \text{ kp/cm}^2$  und  $l_V = 35 \text{ mm}$  eine Traglast  $P = 385 \text{ kp}$  zu erwarten. Selbst unter Annahme der höheren Werte  $x_s = 0,14$ ,  $W = 400 \text{ kp/cm}^2$  und  $l_V = 50 \text{ mm}$  würde die Traglast mit 935 kp noch im Arbeitsbereich des Prüfzylinders liegen. Für die Untersuchungen mit Rippenstahl wurde normalerweise für Betonstahlmatten verwendeter Karistahl (Stahlgüte IVb) mit 5,85 mm Nenndurchmesser ausgewählt. Bei einer Würfel-Druckfestigkeit von  $W = 250 \text{ kp/cm}^2$  und einer Verbundlänge  $l_V = 35 \text{ mm}$  war eine Tragfähigkeit der Versuchskörper bis zu einer Last von  $P = 965 \text{ kp}$  zu erwarten. Aufgrund der errechneten Lasten würde die maximale, nur kurzzeitig wirkende Stahlspannung für den glatten Bewehrungsstahl  $\sigma_{eI} = 1190 \text{ kp/cm}^2$  und für den gerippten Stahl  $\sigma_{eIV} = 3600 \text{ kp/cm}^2$  betragen. Fließvorgänge waren daher auch bei Volllaussteuerung der Anlage,  $P_{\text{soll}} = 1 \text{ Mp}$ , nicht zu erwarten.

Die Probestäbe wurden in würfelartige Betonkörper mit einer Druckfestigkeit zwischen  $250 \text{ kp/cm}^2$  und  $400 \text{ kp/cm}^2$  einbetoniert. Die kubischen Prüfkörper, s. Anlage 3, mit 20 cm Kantenlänge wurden in Stahlformen für Gütewürfel hergestellt. Zur Einstellung der Verbundlänge  $l_V$  erwiesen sich Plastikbecher als geeignet, die im Boden eine Bohrung in der Größe des Stabdurchmessers erhielten. Jeweils zwei Becher wurden auf einem Stab - mit den Böden



gegeneinander gerichtet - so befestigt, daß der Abstand der Böden den gewünschten Verbundlängen entsprach. Die Höhe der Versuchskörper war somit von  $l_v$  abhängig, was jedoch für die Untersuchungen bedeutungslos ist. Mitbestimmend für die Wahl dieser Form für die Prüfkörper war der Wunsch, die Stahldehnung möglichst nahe am Verbundbereich zu messen. Außerdem sollte aber auch der Aufwand gering gehalten werden, da innerhalb dieser Vorversuche vorwiegend die Zweckmäßigkeit der Versuchsanordnung und weniger das Verbundverhalten zu prüfen war. Die Verbundlänge wurde bei den mit Stahl I hergestellten Versuchskörpern variiert (s. Erl. zu Tab. 1), dagegen bei den Prüfkörpern mit geripptem Stahl einheitlich zu  $l_v = 35$  mm gewählt.

Die Ankopplung der Versuchskörper an den Prüfzylinder erfolgte über eine Stahlkonstruktion, wie aus Anlage 2 gesehen werden kann.

Als Belastungsfunktion wurde grundsätzlich eine quasistatische Belastung mit variabler Flankensteilheit, das heißt konstanter Ausziehgeschwindigkeit, gewählt (ramp-Funktion), wobei die Soll-Anstiegszeit zwischen Nulllast und Vollast zwischen den Grenzen von 1 ms und 167 s variiert wurde. Die Hydropulsanlage wurde in Kraftsteuerung betrieben. Es ist zu beachten, daß der Istwert der Kraft nur solange dem Sollwert folgen kann, wie Verbund besteht. Wird die Verbundfestigkeit wesentlich überschritten, dann tritt eine relativ rasche Abnahme der Kraft ein, die mit einer schnellen Zunahme des Gleitweges gekoppelt ist. Da nach dem Lösen des Verbundes die Steifigkeit etwa auf Null zurückgeht, bedarf es für den Ausziehvorgang nahezu keiner Kraft mehr. Auch eine servohydraulisch gesteuerte Prüfmaschine ist in einem solchen Fall - bei Kraftsteuerung - nicht mehr in der Lage, den Regelvorgang aufrecht zu erhalten.

Zur Erzeugung der gewählten Belastungsfunktion sind käufliche Spannungsgeneratoren (Funktionsgeneratoren) nicht geeignet. Es wurde deshalb von der Abteilung Meßtechnik des Instituts für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der TU Braunschweig eigens für die geplanten Untersuchungen ein Funktionsgenerator mit den gewünschten Eigenschaften entwickelt, der jedoch

zum Zeitpunkt der Voruntersuchung noch nicht seinen endgültigen Aufbau besaß.

Außer der Belastungsgeschwindigkeit wurde in zwei Versuchen auch die Steifigkeit der Ankopplung des Versuchskörpers an die Prüfmaschine variiert, um den Einfluß des so veränderten Belastungsdauer-Kennwertes  $\omega \cdot T$  auf den dynamischen Beiwert (Zerstörungskennlinie) zu erhalten. Der Aufwand für eine Variation der Steifigkeit stellte sich als erheblich größer heraus, als zunächst angenommen worden war. Bei der gewünschten weichfedernden Ankopplung der Versuchskörper deuten sich Schwierigkeiten an, die bisher noch nicht befriedigend gelöst werden konnten.

Während des Ablaufs der einzelnen Versuche wurden jeweils folgende Größen als Funktion der Zeit registriert:

- a) Kraft im Stahl
- b) Verschiebung des Stahles am unbelasteten Ende des Prüfkörpers
- c) Verschiebung des Stahles am belasteten Endes des Prüfkörpers, in Nähe der Kraftmeßdose
- d) Sollwert der Kraft (nur mittelbar kalibrierfähig).

Die Verschiebungen wurden mit induktiven Weg-Aufnehmern und der Kraft-Istwert mit einer Kraftmeßdose in Verbindung mit Trägerfrequenz-Meßbrücken (Fa. Hottinger) gemessen und mit einem Schleifenoszillografen (Lumiscrypt) registriert. Anlage 1 zeigt in Form eines Blockschaltbildes die gesamte Versuchsanordnung.

## 2. Meßergebnisse

Aus den Oszillografen-Aufzeichnungen wurden als Meßwerte folgende Größen entnommen:

- a) Maximalkraft  $P_{\max}$
- b) Kraft  $P_H$ , bei der am unbelasteten Stabende die erste meßbare Verschiebung auftritt:  $s_{ub} \gtrsim 0$
- c) Verschiebung des belasteten Stabendes  $s_d$  für  $P = P_{\max}$   
(= Verschiebung des Kolbens samt Kraftmeßdose)

d) Verschiebung von unbelastetem Stabende  $s_{ub}$  für

$$P = P_{\max}$$

e) Verschiebung des belasteten Stabendes  $s_{bo}$  für

$$P = P_H$$

f) Abklingkonstante  $\tau$  für die Kraft bei Annahme eines exponentiellen Kraft-Abfalles nach Überschreiten der Maximalkraft.

Da der Stand der Kenntnis mit der Anzahl der geprüften Versuchskörper zunahm, sind erst bei den letzten Versuchen sämtliche der aufgeführten Größen, deren Definition aus dem Meßbeispiel 3.3, siehe Anl. 5, ersehen werden kann, ermittelt worden. Die im Einzelfall von den Registrierkurven abgegriffenen Werte sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1 siehe folgendes Blatt

Tabelle 1: Meßergebnisse

1	2	3	4	5	6
Versuchskörper- Nummer	Sollkraft- Anstiegszeit $t_o$ in ms	Kraft- Sollwert $P_{soll}$ in kp	Kraft- Maximum $P_{max}$ in kp	Verschiebung des Kolbens $s_b$ in mm	Verschiebung des Stahles $s_{ub}$ in mm
1	< 1	1000	> 1000	-	0
2	< 1	1000	490	-	0,61
3	< 1	1000	238	-	-
4	< 1	1000	140	-	-
5	< 1	1000	640	-	-
6	1,67	1000	634	0,24	0,17
7	16,7	1000	614	0,27	0,10
8	167	1000	556	-	-
9	< 1	1000	275	-	-
10	< 1	1000	871	-	>1,1
11	1,67 J	1000	725	-	-
12	1,67	1000	753	1,15	0,85
13	1,67	1000	730	-	1,22 <sup>2)</sup>
14	1,67	1000	820	1,48	1,00 <sup>3)</sup>
15	1,67	1000	720	0,70	0,56
16	16,7	1000	778	0,72	0,27
17	16,7	1000	781	0,97	0,67
18	16,7	630	637 <sup>4)</sup>	-	-
19	16,7	600	650/710 <sup>5)</sup>	-	-
20	167	1000	914	1,34	0,97
21	167	1000	764	1,03	0,72
22	1.670	1000	768	1,34	1,09
23	16.700	1000	665	1,23	0,96
24	16.700	1000	750	0,46	0,39
25	167.000	1000	735	1,20	0,72

1) Mehr linearer als exp. Abfall innerhalb des Kraft-Anstiegsbereichs.

2) Ankopplung des Versuchskörpers über Styropor - weich.

3) Ankopplung des Versuchskörpers über Styropor - hart.

4) Bewehrungsstab nach 4,5 s ausgezogen.

5) Bewehrungsstab nach 60 s ausgezogen; es konnte eine Nachverfestigung beobachtet werden.

6) Bei rel. langsamen Belastungen ist die Abklingkonstante nicht mehr auswertbar.



7	8	9	10	11	12	13
Kraft bei $s_{ub} \geq 0$ $P_H$ in kp	Verschiebung bei $s_{ub} \geq 0$ $s_{bo}$ in mm	Kraft- Abkling- konstante $\tau$ in ms	Würfel- druck- festigkeit $W$ in $cm^2$	Haft- Spannung $\sigma_{eH}$ in kp/ $cm^2$	Verbund- Spannung $\tau_v$ in kp/ $cm^2$	$x_s$
-	-	-	400	-	64	0,16
175	-	5,5	400	223	62	0,16
-	-	-	330	-	30	0,09
-	-	-	330	-	15	0,04
-	-	-	330	-	58	0,18
178	0,02	9,3	350	227	58	0,16
235	0,08	8,2	350	299	56	0,16
-	-	- 1)	350	-	51	0,14
-	-	-	330	-	22	0,07
150	-	20,4	212	560	136	0,64
610	-	-	250	2276	113	0,45
295	-	8	250	1100	117	0,47
290	0,085	2,8	250	1082	114	0,45
300	0,085	6	250	1119	128	0,51
270	0,084	8	250	1007	112	0,45
515	0,17	6,6	250	1922	121	0,48
578	0,23	4,4	250	2157	122	0,49
500	0,23	1,6	250	1866	99	0,40
470	0,19	1,5	250	1754	101/111	0,40/0,44
450	0,20	14,5	250	1679	142	0,57
530	0,23	11,2	250	1978	119	0,48
449	0,17	< 20,0 <sup>6)</sup>	250	1675	120	0,48
390	0,13	-	250	1455	104	0,41
420	0,18	-	250	1567	117	0,47
380	0,18	-	250	1418	114	0,46

Tabelle 1: Meßergebnisse

Tabelle 1: Meßergebnisse

1	2	3	4	5	6
Versuchskörper- Nummer	Sollkraft- Anstiegszeit $t_o$ in ms	Kraft- Sollwert $P_{soll}$ in kp	Kraft- Maximum $P_{max}$ in kp	Verschiebung des Kolbens $s_b$ in mm	Verschiebung des Stahles $s_{ub}$ in mm
1	< 1	1000	> 1000	-	0
2	< 1	1000	490	-	0,61
3	< 1	1000	238	-	-
4	< 1	1000	140	-	-
5	< 1	1000	640	-	-
6	1,67	1000	634	0,24	0,17
7	16,7	1000	614	0,27	0,10
8	167	1000	556	-	-
9	< 1	1000	275	-	-
10	< 1	1000	871	-	>1,1
11	1,67 $\sqrt$	1000	725	-	-
12	1,67	1000	753	1,15	0,85
13	1,67	1000	730	-	1,22 <sup>2)</sup>
14	1,67	1000	820	1,48	1,00 <sup>3)</sup>
15	1,67	1000	720	0,70	0,56
16	16,7	1000	778	0,72	0,27
17	16,7	1000	781	0,97	0,67
18	16,7	630	637 <sup>4)</sup>	-	-
19	16,7	600	650/710 <sup>5)</sup>	-	-
20	167	1000	914	1,34	0,97
21	167	1000	764	1,03	0,72
22	1.670	1000	768	1,34	1,09
23	16.700	1000	665	1,23	0,96
24	16.700	1000	750	0,46	0,39
25	167.000	1000	735	1,20	0,72

1) Mehr linearer als exp. Abfall innerhalb des Kraft-Anstiegsbereichs.

2) Ankopplung des Versuchskörpers über Styropor - weich.

3) Ankopplung des Versuchskörpers über Styropor - hart.

4) Bewehrungsstab nach 4,5 s ausgezogen.

5) Bewehrungsstab nach 60 s ausgezogen; es konnte eine Nachverfestigung beobachtet werden.

6) Bei rel. langsamen Belastungen ist die Abklingkonstante nicht mehr auswertbar.

7	8	9	10	11	12	13
Kraft bei $s_{ub} \geq 0$ $P_H$ in kp	Verschiebung bei $s_{ub} \geq 0$ $s_{bo}$ in mm	Kraft- Abkling- konstante $\tau$ in ms	Würfel- druck- festigkeit $W$ in $cm^2$	Haft- Spannung $\sigma_{eH}$ in kp/ $cm^2$	Verbund- Spannung $\tau_v$ in kp/ $cm^2$	$x_s$
-	-	-	400	-	64	0,16
175	-	5,5	400	223	62	0,16
-	-	-	330	-	30	0,09
-	-	-	330	-	15	0,04
-	-	-	330	-	58	0,18
178	0,02	9,3	350	227	58	0,16
235	0,08	8,2	350	299	56	0,16
-	-	- 1)	350	-	51	0,14
-	-	-	330	-	22	0,07
150	-	20,4	212	560	136	0,64
610	-	-	250	2276	113	0,45
295	-	8	250	1100	117	0,47
290	0,085	2,8	250	1082	114	0,45
300	0,085	6	250	1119	128	0,51
270	0,084	8	250	1007	112	0,45
515	0,17	6,6	250	1922	121	0,48
578	0,23	4,4	250	2157	122	0,49
500	0,23	1,6	250	1866	99	0,40
470	0,19	1,5	250	1754	101/111	0,40/0,44
450	0,20	14,5	250	1679	142	0,57
530	0,23	11,2	250	1978	119	0,48
449	0,17	< 20,0 <sup>6)</sup>	250	1675	120	0,48
390	0,13	-	250	1455	104	0,41
420	0,18	-	250	1567	117	0,47
380	0,18	-	250	1418	114	0,46

Tabelle 1: Meßergebnisse

# Erläuterungen zu Tabelle 1, Meßergebnisse

Spalte 1:	Versuchskörper-Nr.	1 bis 9: Stahl I, Ø 10 mm				
	Versuchskörper-Nr.	: 1	2,3	4	5-8	9
	Verbundlänge $l_v$ in mm	: 50	25	30	35	40

Bei drei weiteren Prüfkörpern mit Stahl I und einer Verbundlänge von 50 mm konnten die Bewehrungsstäbe nicht ausgezogen werden, da die stoßartige Belastung zu einem Versagen der Befestigungsmuffe führte.

Versuchskörper-Nr. 10 bis 25: Stahl IVb, Ø 5,85 mm  
Verbundlänge einheitlich  $l_v = 35$  mm.

Spalte 2: Sollkraft-Abstiegszeit  $t_o$   
Werte  $t_o < 1$  ms gelten für Rechteckimpulse mit etwa 20 µs Flankensteilheit. Bis auf eine angegebene Ausnahme gelten die Anstiegszeiten  $1,67 \cdot 10^m$  ms ( $m = 1, 2, 3, 4, 5$ ) für ramp-Funktionen. Die Belastungsgeschwindigkeit lag maximal bei etwa 200 Mp/s; im Mittel jedoch bei 80 Mp/s.

Spalte 3: Kraft-Sollwert in kp  
Hier ist die statische Belastung nach Erreichen der Kraft-Anstiegszeit angegeben.

Spalte 4: Kraft-Maximum  
Die Werte in dieser Spalte und in Spalte 7 enthalten eine statische Vorlast von etwa 50 kp. Die Zeit  $t_{max}$  nach der das Maximum der Belastung erreicht wird, entsprach für eine Anstiegszeit  $t_o > 20$  ms, etwa  $t_{max} = t_o \cdot P_{max}/P_{soll}$ , während für  $t_o < 20$  ms das Maximum später auftrat, als diesem linearen Zusammenhang entspricht. Infolge anlagebedingter Schaltzeiten kann auch für beliebig kleine Belastungen eine Anstiegszeit von 3,5 ms nicht unterschritten werden.

Spalte 5: Verschiebung des Kolbens  
Hierunter wird der Weg des Kolbens  $\hat{=}$  Weg der Kraft-Meßdose  $\hat{=}$  Weg des belasteten Endes des Bewehrungsstabes verstanden. Die Länge des belasteten, nichteinbetonierten Stahles betrug in allen Fällen etwa 11,5 cm.

Spalte 6: Verschiebung des Stahles:  
Verschiebung des unbelasteten Stahlendes, das in der Ruhelage etwa 2 cm aus den Versuchskörpern herausstand.

Die Angaben von Spalte 5 und Spalte 6 beziehen sich auf das Maximum der Ausziehenkraft. Die Differenz der Verschiebungen  $\Delta l_e = (s_b - s_{ub max})$  ( $\hat{=}$  Absolutwert der Dehnung) trat zur selben Zeit wie das Kraftmaximum auf.



- Spalte 7: Kraft  $P_H$  bei  $s_{ub} \geq 0$   
Hier ist diejenige Kraft angegeben, bei dem am unbelasteten Ende des Bewehrungsstabes erstmals eine Verschiebung registriert wird und der Stahl aus dem Versuchskörper zu gleiten beginnt.
- Spalte 8: Verschiebung bei  $s_{ub} \geq 0$   
Die in Spalte 7 und 8 angegebenen Werte sind innerhalb bestimmter Grenzen von der Verbundlänge abhängig. Bis zu einer besseren Klärung der Zusammenhänge wird angenommen, daß die weitere Belastung bis zum Erreichen des Kraftmaximums zur Überwindung des Gleitwiderstandes dient.
- Spalte 9: 1)  
Kraft-Abklingkonstante  $\tau$   
Der hier angegebene Wert ist die Zeitkonstante, mit der die Kraft nach Überschreiten des Maximums, Spalte 4, abnimmt. Aufgrund der Meßergebnisse wird angenommen, daß die Kraft bzw. die Dehnung des Stahles nach Überschreiten des Kraftmaximums, Spalte 4, vorwiegend exponentiell abgebaut wird.
- Spalte 10: Würfel-Druckfestigkeit  
Die Druckfestigkeit der Gütewürfel wurde etwa zum Zeitpunkt der Ausziehversuche, d. h. in einem Alter zwischen 10 (Versuch 10) und etwa 80 bis 100 Tagen (Versuch 11 bis 25) ermittelt. Die Streuung der Einzelergebnisse war hierbei gering, so daß eine Zuordnung zu den einzelnen Versuchskörpern nicht notwendig erschien.
- Spalte 11: Haftspannung  $\tau_H$   
Die Haftspannung  $\tau_H$  wird bei der Stahlspannung  $\sigma_{eH} = \frac{P_H}{F_e} = \tau_H$  erreicht,  $P_H$  s. Seite 7. Der Querschnitt betrug für den glatten Stahl  $F_e = 0,785 \text{ cm}^2$  und für den gerippten Karistahl  $F_e = 0,268 \text{ cm}^2$ .
- Spalte 12: Verbundspannung  $\tau_v$   
Die angegebene Spannung  $\tau_v = P_{max}/F_s$  ist die auf die Scherfläche bezogene Maximal-Kraft, die also sowohl den Scherwiderstand als auch den Gleitwiderstand enthält. Wegen der geringen Profilierung des Karistahles wurde von einer getrennten Berücksichtigung der Pressungen (Normalspannungen) abgesehen.
- Spalte 13: Bezogene Scherspannung  $x_s = \frac{s}{W}$ ; allgemein verwendete Größe zur Kennzeichnung des Verbundverhaltens nach Rehm, vgl. Heft 138 des DAfStb.

1)

Das Symbol  $\tau$  ist zwar für Abklingvorgänge üblich, wird aber künftig, um Verwechslungen mit der Verbundfestigkeit zu vermeiden, durch ein anderes Symbol ersetzt.

### 3. Auswertung der Meßergebnisse

Das wichtigste Ergebnis dieser Voruntersuchungen ist die Feststellung, daß die Hydropulsanlage bereits in Verbindung mit einem Prüfzylinder schwacher Leistung als geeignet für die Ausziehversuche unter Kurzzeitbeanspruchung angesehen werden kann. Mängel irgendwelcher Art, die eine derartige Verwendung der Anlage in Frage stellen könnten, z. B. durch die Pumpe eingeleitete oder bei stoßartiger Belastung ausgelöste Eigenschwingungen von Teilen der Prüfmaschine, wurden nicht beobachtet. Allerdings erfordert die Versuchsdurchführung, die zweckmäßigerweise anhand einer check-Liste erfolgt, insgesamt einen so hohen Aufwand, daß bei den Prüfungen nach dem als Anlage 11a beigefügten Programm wahrscheinlich pro Tag nur 3 Versuchskörper untersucht werden können.

Aufgrund des reibungslosen Ablaufs der bisher durchgeführten Untersuchungen konnte sich die Auswertung mehr auf die registrierten Zeitfunktionen als auf die Eigenschaften der Anlage konzentrieren. Im vorliegenden Fall interessieren als wichtigste Zusammenhänge der Verlauf der Maximalkraft in Abhängigkeit von der Last-Anstiegszeit und der Kraft-Verlauf als Funktion der Stahlverschiebung.

In Anlage 6 ist die Abhängigkeit der gemessenen Maximalkraft für die einzelnen Last-Anstiegszeiten dargestellt. Wie man erkennt, scheint  $P_{\max}$  oberhalb von  $t_0 = 0,167$  s abzunehmen, wenn die Anstiegszeit zunimmt, d. h. die Belastung langsam erfolgt. Ebensogut könnte man aber auch zu der Ansicht kommen, daß überhaupt keine Zeitabhängigkeit der Maximalkraft besteht, da die Wiederholstreuung bei den einzelnen Versuchen noch zu hoch ist, um einen quantitativen Zusammenhang aus Anlage 6 herauslesen zu können.

Dagegen zeichnet sich bei der zur Einleitung des Ausziehvorganges erforderlichen Kraft ein Einfluß der Anstiegszeit  $t_0$  ab, vgl. Anl. 7: Bei der schnellsten Belastung ( $t_0 < 1,67$  ms) wurden mehrfach kleinere Kräfte als bei langsamem Lastanstieg festgestellt, und ebenso ist bei langsamer Belastung ( $t_0 > 0,167$  s) eine abmindernde Tendenz vorhanden. Da die Meßunsicherheit auch in diesem Bereich relativ hoch ist, empfiehlt es sich, vor einer Verallgemeinerung und Interpretation die Ergebnisse weiterer Messungen abzuwarten.

Allgemeines Ziel der geplanten Untersuchungen ist es bekanntlich - über den Weg von Ersatzkräften und Ersatzverformungen - statische Bemessungsgrundlagen in der jedem Bauingenieur vertrauten Art aufzustellen. Für eine Bemessung von Stahlbetonbauteilen interessiert in erster Linie der Zusammenhang zwischen Kraft und Verformung, während der Zeiteinfluß hier nur als Parameter berücksichtigt wird. Deshalb wurde für eine Anzahl registrierter Meßkurven mit geripptem Stahl die Zeit eliminiert und somit der Zusammenhang zwischen Kraft und Verformung unmittelbar sichtbar gemacht, vgl. Anl. 8 und 9. Diese P-s-Diagramme bestätigen ebenfalls den nur geringen Zeiteinfluß. Für Last-Anstiegszeiten im Sekundenbereich (Belastungsgeschwindigkeit  $v_p < 1 \text{ Mp/s}$ ) läßt sich praktisch überhaupt keine Zeitabhängigkeit nachweisen. Die vorhandenen Unterschiede sind als normale Festigkeits- und Meßstreuung anzusehen. Bei Anstiegszeiten  $t_0 < 100 \text{ ms}$  (Belastungsgeschwindigkeit  $v_p > 10 \text{ Mp/s}$ ) ist dagegen für baupraktisch uninteressante Verschiebungen  $s_b > 1 \text{ mm}$  eine Auffächerung in Abhängigkeit von der Belastungsgeschwindigkeit feststellbar. Innerhalb des Verbundbereiches ( $s_b < 0,5 \text{ mm}$ ) zeigt sich jedoch auch hier kein Einfluß des Zeitparameters. Als Ursache sind hierfür zu nennen:

1. Zu steife Ankopplung der Prüfkörper
2. Verwendung einer unzweckmäßigen Belastungsfunktion

Zu 1: Aus gelegentlich dem Kraftverlauf überlagerten Schwingungen konnte abgelesen werden, daß die Eigenfrequenz der Anordnung: Prüfkörper (c) + Kolben der Prüfmaschine (m) etwa  $f = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{c}{m}} \approx 130 \text{ Hz}$  bzw. die Dauer einer Viertelperiode  $\frac{T}{4} = 1,92 \text{ ms}$  betrug. Eine ballistische Beanspruchung ( $\omega \cdot T < 1$ ), für die ein zeitabhängiges Verhalten im P-s-Diagramm eintreten muß, wäre daher bei einer anlagebedingten minimalen Impulsanstiegszeit von 3 ms erst für eine kleinere Eigenfrequenz der Anordnung als 50 Hz zu erwarten.

Zu 2: Die als Belastungsfunktion gewählte ramp-Funktion ist nur dann mit einem Impuls vergleichbar, wenn die Verbundfestigkeit innerhalb der Anstiegszeit überschritten wird. Das war im allgemeinen der Fall. Da aber die Belastung nach Überschreitung der maximal aufnehmbaren

Kraft auch dann noch zunahm, mußte der Stahl in jedem Fall ausgezogen werden (im Gegensatz zu einer echten Impulsbeanspruchung). Wie groß der Zeiteinfluß sein kann, zeigt die Untersuchung mit weichfedernden Einlagen, vgl. Tab. 1, VK-Nr. 11-15. Die Maximal-Kraft lag bei den 4 Versuchskörpern in dem engen Intervall zwischen 720 und 820 kp. Während jedoch bei den steifangekoppelten Versuchskörpern 11, 12 und 15 die Zeit bis zum Eintritt des Kraft-Maximums etwa 3,5 ms betrug, war mit einer Beilage aus Styropor-hart ( $s' \approx 10 \text{ kp/cm}^3$ ) das Maximum der Kraft erst nach 14 ms und mit Styropor-weich ( $s' \approx 3 \text{ kp/cm}^3$ ) erst nach 48 ms erreicht. Im letzten Falle, s. Anlage 4, Beispiel 2.2, hätte also ein kurzer Impuls - anstelle der ramp-Funktion - noch nicht zum Verlust des Haft-Verbundes zwischen Beton und Stahl geführt.

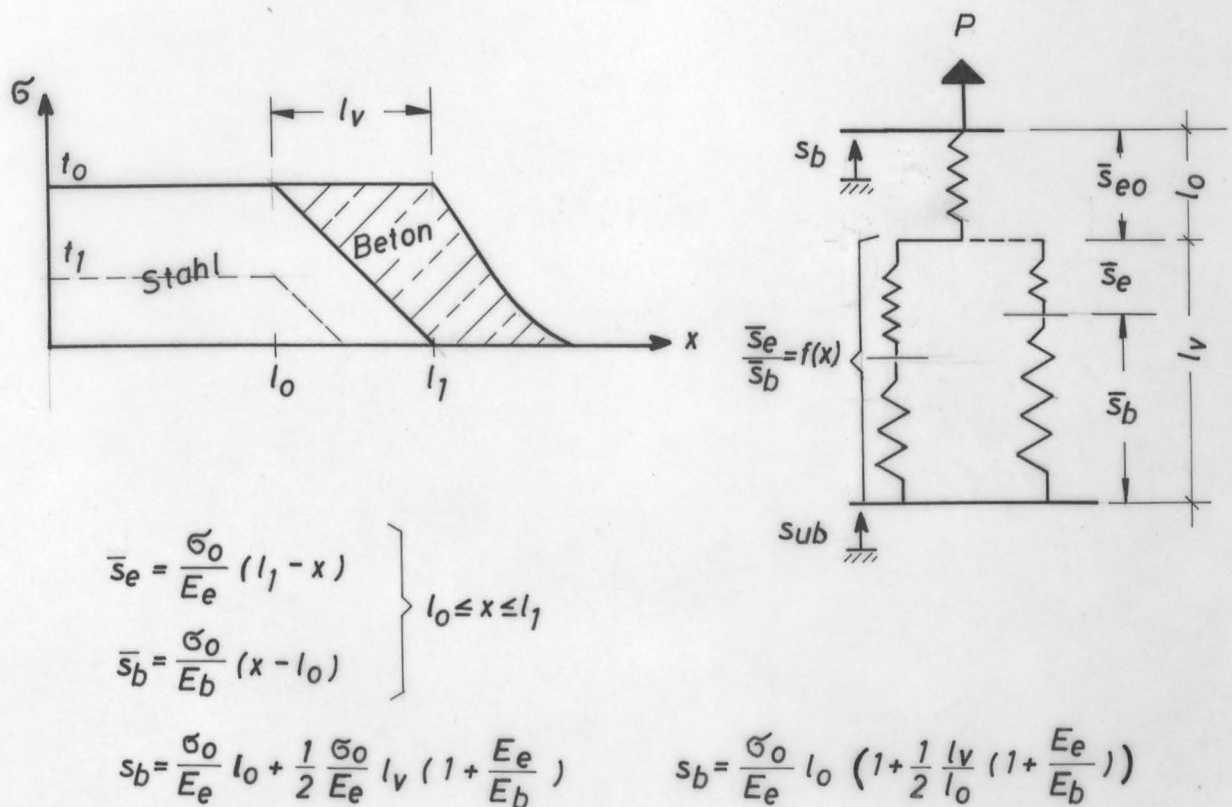
Unter der Annahme, daß sich die Spannung im Stahl näherungsweise linear abbaut bzw. linear auf den Beton überträgt, kann die Größenordnung der Verformung  $s_b$  am belasteten Ende des Bewehrungsstabes einfach abgeschätzt werden, s. Blatt 14. Bei der Berechnung muß für  $\sigma_0$  zum Zeitpunkt  $t = t_0$  derjenige Wert eingesetzt werden, für den die Betonspannung am Ende des Verbundbereiches,  $x = l_1$ , der Stahlspannung im freien Bereich,  $x < l_0$ , entspricht. Das ist mit Sicherheit dann der Fall, wenn am unbelasteten Stabende der Ausziehvorgang beginnt,  $s_{ub} \geq 0$ . Bei den Karistählen gehört zu dieser Verschiebung nach Tabelle 1 ungefähr die Last  $P = 490 \text{ kp}$  beziehungsweise die Spannung  $\sigma = 1830 \text{ kp/cm}^2$ . Damit ergibt sich für die Gesamtdehnung

a) rechnerisch  $s_b = 0,216 \text{ mm}$

b) aus den Messungen  $s_b = 0,20 \text{ mm} \pm 0,03 \text{ mm}$ .

Bei einigen Anstiegsgeschwindigkeiten, besonders bei  $t_0 = 1,67 \text{ ms}$ , traten niedrigere Werte für die Verschiebung des belasteten Stabendes auf, zu denen jedoch auch kleinere Werte von  $P_H$  gehören. Wenn man bedenkt, daß für die Spannungsverteilung längs des einbetonierten Stabes die einfachste aller denkbaren Verteilungen gewählt wurde, kann die Übereinstimmung zwischen Messung und Rechenwert als recht gut bezeichnet werden.





Bei größeren Beanspruchungen wird der Verbund weitgehend gelöst und der Gleitwiderstand in zunehmendem Maße überwunden. In diesem Bereich ist der Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung noch nicht gesetzmäßig zu erfassen. Die versuchsweise Auftragung der Verschiebung des unbelasteten Stabendes als Funktion der Anstiegszeit läßt keine Gesetzmäßigkeit erkennen. Im Gegensatz dazu ist für die maximale Stahldehnung  $\Delta l_e = s_b - s_{sub}$  im Moment des Kraft-Maximums ein ähnlicher Zeiteinfluß vorhanden wie bei  $P_{max}$  (s. Anl. 10). Hierdurch bestätigt sich, daß die einzelnen Zeitfunktionen synchron registriert wurden und zwischen ihnen keine Phasenunterschiede bestehen. Allerdings läßt sich die wichtige Voraussetzung einer zeitsynchronen Registrierung aller Vorgänge aus den Registrierstreifen auch einfacher - aus dem übereinstimmenden Beginn von Belastung und Verschiebung - entnehmen.

Die Untersuchungen und weiterführende Überlegungen haben gezeigt, daß es zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht sinnvoll ist, aufwendige Modellvorstellungen für die Deutung der Meßergebnisse zu entwickeln. Solange durch die Streuung der Meßwerte eventuell vorhandene Gesetzmäßigkeiten

und Zeitabhängigkeiten verdeckt werden, kann man nicht erwarten, daß durch Modellvorstellungen differenzierende Aussagen möglich sind, die über die Grenzen des momentanen Wissens hinausführen. Vermutlich wird es nicht möglich sein, die Streuung der Meßwerte durch eine Änderung der Versuchsbedingungen wesentlich einzuschränken. Daher wird man auf eine statistische Auswertung zurückgreifen müssen, was einen wesentlich vergrößerten Prüfumfang erfordert.

Das Verhalten der bisher untersuchten Ausziehkörper läßt sich in erster Näherung wie folgt beschreiben:

Die Kraft folgt bis zum Erreichen des Maximal-Wertes  $P_{\max}$  der äußeren Belastung  $P = P_0 \cdot \frac{t}{t_0}$ . Hieran schließt sich eine exponentielle Abnahme der Kraft an, wobei die Zeitkonstante des Abklingvorganges vermutlich vorwiegend vom Gleitwiderstand verursacht und nur in untergeordnetem Maße durch die Eigenschaften der Meßgeräte bedingt ist. Die zugehörigen Verschiebungen sind, solange Verbund besteht, am unbelasteten Ende Null und wachsen am belasteten Stabteil anfangs linear, bei stärkerem Mitwirken des Betons jedoch nur noch monoton mit der Belastung. Erst nach dem Verlust des Verbundes nimmt die Verschiebung stark zu, und zwar infolge der dann nahezu kräftefreien Bewegung etwa linear mit der Zeit. Qualitativ läßt sich dieses Verhalten wie folgt beschreiben:

Bereich 1: elastisches Verhalten:

$$\begin{array}{lcl} \text{Kraft: } P_{el} = c s_b = P_0 \frac{t}{t_0} & \left| \begin{array}{l} \text{mit} \\ \frac{1}{c} = \frac{1}{c_e} + \frac{1}{c_b} \end{array} \right. & \\ \text{Weg: } s_b = \frac{P_0}{c t_0} t & & \end{array}$$

Bereich 2: träges Verhalten:

$$\begin{array}{lcl} \text{Kraft: } t \approx t_{\max} : m\ddot{x} = P_{\max} & & \\ & t > t_{\max} : m\ddot{x} = 0 & \\ \text{Weg: } t > t_{\max} : x = \frac{P_{\max}}{2m} t_{\max}^2 \left( 2 \frac{t}{t_{\max}} - 1 \right) & & \end{array}$$

Diese Vorstellung kommt also noch mit den einfachsten Elementen elektromechanischer Modelle, Masse und Feder, aus. Ein Reibungsglied erweist sich erst dann als notwendig, wenn der Abklingvorgang der Kraft mit berücksichtigt werden soll.

Die Lösung der vollständigen Bewegungsgleichung

$$m\ddot{x} + r(x,t)\dot{x} + c(x,t)x = \begin{cases} P_0 \frac{t}{t_0} & ; t \leq t_0 \\ P_0 & ; t \geq t_0 \end{cases}$$

mit verschiedenen Ansätzen für  $r$  und  $c$ ,

$$\text{z. B. } r(x,t) = r(x) = r_0 \frac{l_v}{l_v + x} \quad (+ \text{ nichtlineare Differentialgleichung})$$

$$\text{oder } r(x,t) = r(t) = r_0 \left(1 - \frac{t}{t_r}\right) \quad (+ \text{ lineare Differentialgleichung mit nichtkonstanten Koeffizienten}),$$

erfordert einen hohen Rechenaufwand, der im Rahmen dieser Voruntersuchungen nicht gerechtfertigt ist, zumal bisher keine ausreichende Anzahl von Versuchsergebnissen für die Prüfung einer Theorie vorliegen.

Kontrollversuche mit Dreieck- und Rechteckimpulsen an nicht einbetonierten Stahlstäben ergaben, daß der annähernd exponentielle Kraftverlauf nach Überschreiten der Maximallast nicht auf die Meßeinrichtung zurückzuführen ist. Daher wird der eigentliche Ausziehvorgang zunächst wie folgt dargestellt: Nach Überwinden der Verbundfestigkeit erfährt der Bewehrungsstab - zusammen mit der Kraftmeßdose und dem Kolben des Prüfzylinders - eine kräftefreie und daher mit konstanter Geschwindigkeit erfolgende Bewegung, siehe oben. Während dieses Vorganges entspannt sich etwa innerhalb von 20 ms der Bewehrungsstab. Dieses Einstellen eines spannungslosen Zustandes im Bewehrungsstab wird nur noch durch den Gleitwiderstand behindert. Es ist zu beachten, daß die Bewegung des belasteten Stabendes unmittelbar mit einem induktiven Wegaufnehmer dagegen die Kraft als Dehnung mit einer Kraftmeßdose gemessen wird. Bei der Dehnungsmessung zur Kraftbestimmung macht sich der Gleitwiderstand noch als Kraft (Reibung) bemerkbar:

$$c\Delta l = P \quad \text{für } P < P_{\max}$$

$$c\Delta l + r \frac{d(\Delta l)}{dt} = 0 \quad \text{für } P > P_{\max}$$

$$\Delta l = \Delta l_0 e^{-\frac{c}{r} t} \quad \text{bzw. } c\Delta l = P = P_0 e^{-\frac{c}{r} t}$$

#### 4. Zusammenfassung der Ergebnisse der Voruntersuchungen

##### 1. Ergebnisse, die die Eignung der Hydropulsanlage betreffen:

- 1.1 Die Anlage ist mit beliebigen Funktionen innerhalb der garantierten Grenzen für Maximalkraft, Maximalgeschwindigkeit und Hub steuerbar. Zusätzliche Grenzen der Anlage sind durch eine minimale Schaltzeit (Minimalzeit) von 3,5 ms und durch eine Verzögerungszeit (Totzeit) von etwa 3 ms gegeben.
- 1.2 Für die mit dieser Anlage geplanten Untersuchungen zur Simulation einer ballistischen Belastung ist die Minimalzeit besonders wichtig. Die angegebene Zeit wurde aus Untersuchungen mit einer ramp-Funktion ermittelt. Bei Verwendung von Impulsen, z. B. Dreieckimpulsen, muß wegen der zweimaligen Geschwindigkeitsänderung (=Beschleunigung) mit einer doppelt so großen Minimalzeit  $t_m \geq 7$  ms gerechnet werden.
- 1.3 Die Versuchsanordnung erlaubt eine exakt synchrone Registrierung aller Vorgänge. Es hat sich daher als unnötig erwiesen, neben der Kraft noch die Dehnung des Bewehrungsstabes am belasteten Ende zu messen. Dehnungsmessungen sind jedoch in einem späteren Versuchsabschnitt zur Ermittlung der Spannungsverteilung längs des Verbundbereiches im Inneren der Bewehrungsstäbe vorgesehen.
- 1.4 Aus Gründen der Meßgenauigkeit muß für die geplanten Ausziehversuche die Hydropulsanlage mit Kraftsteuerung betrieben werden. Eine Durchführung dieser Untersuchungen mit Wegsteuerung, die eine bessere Beantwortung der Frage ermöglicht, bis zu welchen Verschiebungen Verbund gewährleistet werden kann, ist nicht möglich. Aufgrund der relativ kleinen Verschiebungen zur Lösung des Haftverbundes im Vergleich zum Gesamtweg des Kolbens im Prüfzylinder ergeben sich hierbei große Ungenauigkeiten.
- 1.5 Wird die Hydropulsanlage bei Kraftsteuerung im Leerlauf ( $m \cdot b = 0$ ) betrieben, wie es nach Lösen des Verbundes geschieht, so ist die Maschine nicht mehr steuerbar; die Maximalgeschwindigkeit des Kolbens beträgt dann etwa 70 cm/s, unabhängig vom Kraft-Sollwert. Soll der verbundfreie Bereich, in dem zu großen Verschiebungen nur kleine Kräfte erforderlich sind, näher untersucht werden, muß die Anlage mit Wegsteuerung betrieben werden, vgl. Abs. 1.4.
- 1.6 Sofern beim Ausziehvorgang der Kolben des Prüfzylinders in die Endstellung gerät, erfolgt ein Stoß, dessen Maximalkraft jedoch 50 kp nicht übersteigt. Eine wesentliche Verfälschung von Meßergebnissen ist hierdurch also nicht zu erwarten.

##### 2. Ergebnisse, die das Verbundverhalten betreffen:

- 2.1 Bei den bisherigen Untersuchungen wurde eine quasistatische Belastung aufgebracht. Die bezogene Scherfestigkeit entsprach daher bei den bisher geprüften zwei Stahlsorten in etwa den von Rehm in Heft 138 des Dt. Ausschusses für Stahlbeton angegebenen Werten.



- 2.2 Die Variation der Verbundlänge bei einigen Versuchskörpern mit glattem Stahl hat nicht zu einer entsprechenden Abhängigkeit der Maximalkräfte geführt.
- 2.3 Bei Versuchskörpern mit Stahl I war die Streuung von zu verschiedenen Zeiten hergestellten Versuchskörpern extrem groß. Da diese Unterschiede nicht auf eine unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheit der Bewehrungsstäbe zurückgeführt werden können, steht eine Erklärung noch aus.
- 2.4 Bei einem Versuchskörper aus relativ jungem Beton, Alter 10 Tage, ergab sich eine wesentlich größere Abklingkonstante der Kraft nach Überschreiten des Maximums. Dieses Verhalten könnte durch die mehr plastischen Eigenschaften von jungem Beton zu deuten sein; eine modellmäßige Deutung ist durch Annahme eines größeren Gleitwiderstandes oder einer kleineren Betonsteifigkeit möglich.
- 2.5 Die Versuchskörper der verwendeten Form sind zwar einfach herzustellen, haben sich jedoch als unzuweckmäßig erwiesen. Am belasteten Ende des Bewehrungsstabes treten mitunter so hohe Betonzugspannungen auf, daß Betonkegel von etwa 30 mm Ø und 15 mm Höhe mit dem Stahl ausgezogen wurden.
- 2.6 Der Gleitwiderstand hat sich in allen bisher geprüften Fällen als größer als der Haftverbund erwiesen. Die maximale Kraft wurde in allen Fällen erst dann erreicht, wenn die Verschiebung am unbelasteten Stahlende mindestens 0,6 mm betrug.
- 2.7 Die annähernd exponentielle Abnahme der Kraft nach Überschreiten des Maximums erfolgt umso schneller je höher die Belastungsgeschwindigkeit ist, aber auch umso schneller je länger eine etwa konstante Last in der Größe der Maximal-Kraft auf den Versuchskörper eingewirkt hat.
- 2.8 Es wurde beobachtet, daß bei Vorgabe eines kleinen Kolbenweges,  $s_p < 25$  mm, die Kraft nach dem Lösen des Verbundes praktisch auf den Wert 0 zurückging, während sie sich bei Vorgabe eines Kolbenweges von 50 mm nach Überschreiten des Kraft-Maximums auf einen Wert von etwa 50 - 100 kp einstellte. Entsprechend diesem Meßergebnis konnte bei Versuchskörpern, die mit kurzem Kolbenhub geprüft wurden, der Bewehrungsstab nach Abschluß der Untersuchungen vollständig mit der Hand aus den Betonwürfeln herausgezogen werden, im Gegensatz zu den anderen. Vermutlich verklebten sich bei Vorgabe eines größeren Hubes die Stäbe entweder durch einzelne abgescherte Mörtelteile oder es macht sich so eine unvermeidliche Anfangskrümmung der Probestäbe bemerkbar. Daher ist auf einwandfrei gerade Bewehrungsstäbe großer Wert zu legen.

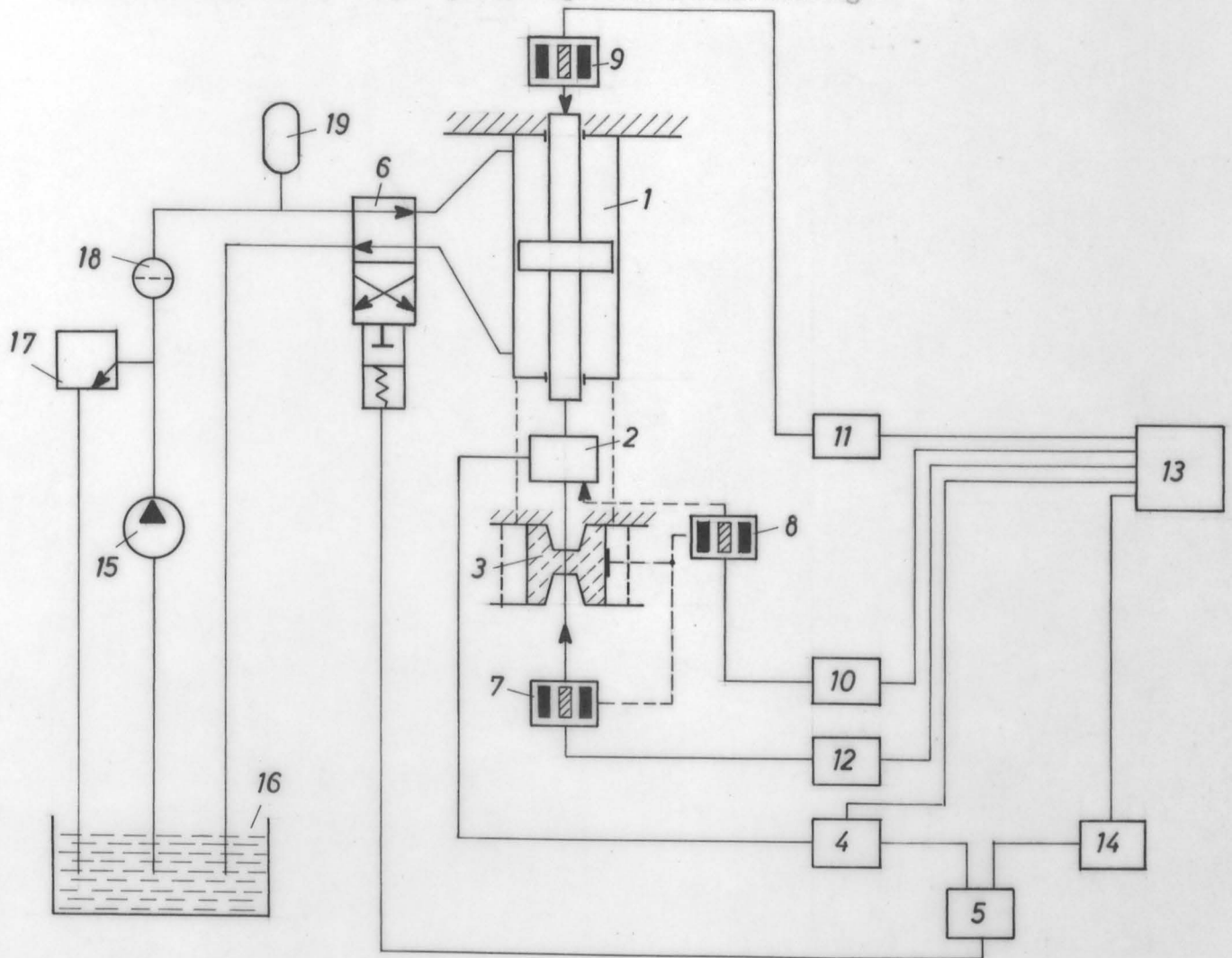
### 3. Ergebnisse, die das Versuchsprogramm betreffen:

- 3.1 Es hat sich bestätigt, daß eine steife Ankopplung zwar zu einer relativ guten Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse im Anfangs-Lastbereich führt, diese aber gleichzeitig eine quasistatische Belastung der Versuchskörper hervorruft. Die angestrebte ballistische Belastung erfordert daher, die Eigenfrequenz der Anordnung Versuchskörper-Prüfmaschinenkolben herabzusetzen auf etwa 20 Hz. Dementsprechend konnte bisher kein Einfluß der Belastungsgeschwindigkeit festgestellt werden.

- 3.2 Bei einer Lastanstiegszeit von 16,7 ms wird eine impulsartige Belastung vorgetäuscht, die sich in einem sinusartigen anstelle des linearen Lastanstieges äußert. Es dürfte sich hierbei jedoch nur um einen Effekt der Einfederung in der Kontaktzone zwischen Versuchskörper und Stahl-Belastungsgestell handeln. Für genauere Messungen muß daher jeder einzelne Versuchskörper im Mörtelbett an den Prüfzylinder angesetzt werden.
- 3.3 Für die Fortsetzung der Untersuchungen mit einem 25 Mp-Prüfzylinder empfiehlt es sich, zunächst ähnliche Untersuchungen an dickeren, glatten und profilierten Stählen durchzuführen. Hierbei sollte einer noch zu bestimmenden Gebrauchsspannung als statischer Vorlast ein Dreiecksimpuls als ballistische Zusatzlast überlagert werden. Ein anhand der bisher gesammelten Erfahrungen aufgestelltes Prüfprogramm ist diesem Bericht als Anlage 11 beigelegt.

Erst im Rahmen späterer Untersuchungen dürfte es möglich sein, die Einflüsse der Betongüte, des Betonalters, der Verankerung, der Profilform, der Lage der Bewehrungsstäbe beim Betonieren oder die Verbundhaftung bei Kurzzeitbeanspruchung an komplizierteren Systemen, z. B. balkenartige Prüfkörper mit mehreren Stählen oder mit Betonstahlmatten, zu untersuchen.

Braunschweig, den 1. April 1970  
- St/Rö -



1 Arbeitszylinder; 2 Kraftmeßdose; 3 Prüfling; 4, 10, 11, 12 Meßverstärker; 5 Regelverstärker; 6 Elektrohydraulisches Servoventil; 7, 8, 9 Induktive Wegaufnehmer; 13 Lichtstrahlloszillograf; 14 Funktionsgenerator; 15, 16, 17, 18, 19 Hydraulikaggregat, bestehend aus 15 Pumpe, 16 Ölbehälter, 17 Entlastungsventil, 18 Filter, 19 Druckspeicher.

### Beschreibung der Arbeitsweise

Das elektrohydraulische Servoventil 6 steuert den Ölfuß zum Arbeitszylinder 1, der die am Prüfobjekt 3 verlangte Prüfkraft erzeugt. Diese Prüfkraft wird in der Kraftmeßdose 2 gemessen (Istwert) und im Meßverstärker 4 in eine der Prüfkraft proportionale elektrische Spannung umgeformt. Diese Spannung wird im Regelverstärker 5 mit der vom Sollwertgeber (Funktionsgenerator) 14 kommenden Führungsgröße (Sollwert) verglichen. Bei einer Differenz zwischen Soll- und Istwert wird im Regelverstärker mit Hilfe von Netzwerken und einem Leistungsverstärker der zum Betätigen des Servoventils erforderliche elektrische Strom erzeugt. Die Elemente 1... bilden einen geschlossenen Regelkreis. Ein Hydraulikaggregat (15 bis 19) dient zur Energieversorgung.

2 a: Geräteaufbau  
zur Steuerung und Messung

2 b: Versuchsanordnung,  
von oben nach unten:

Prüfzylinder

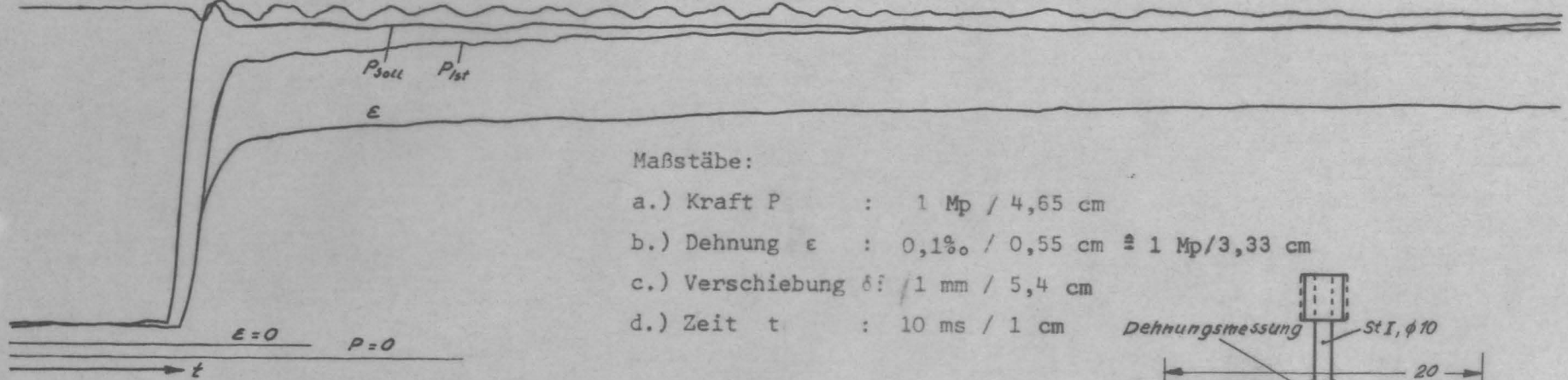
Belastungsgestell mit Kraft-  
meßdose

Versuchskörper

2 c: Detail von 2 b



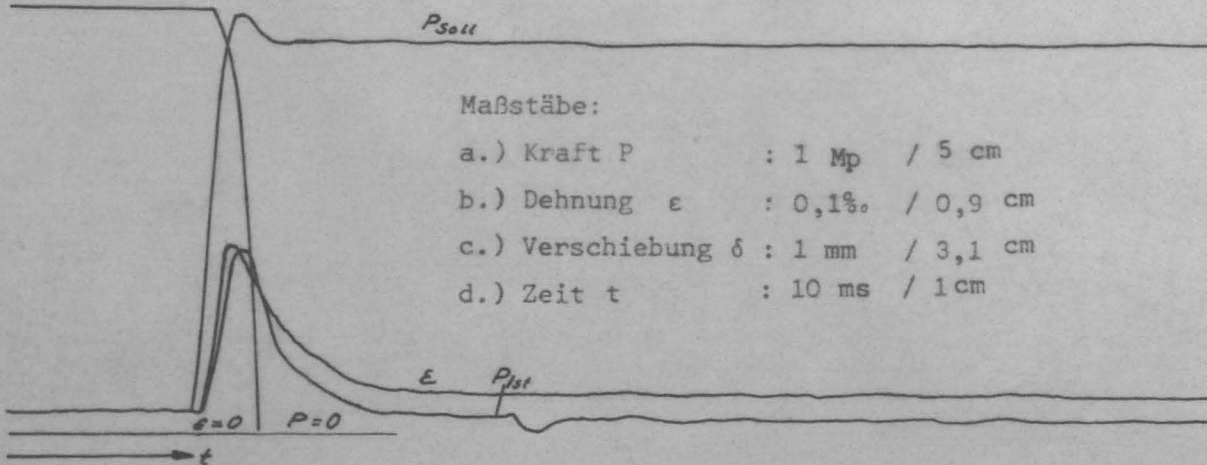
1.1

Verbundlänge  $l_v = 50 \text{ mm}$  $\delta = 0$ 

Maßstäbe:

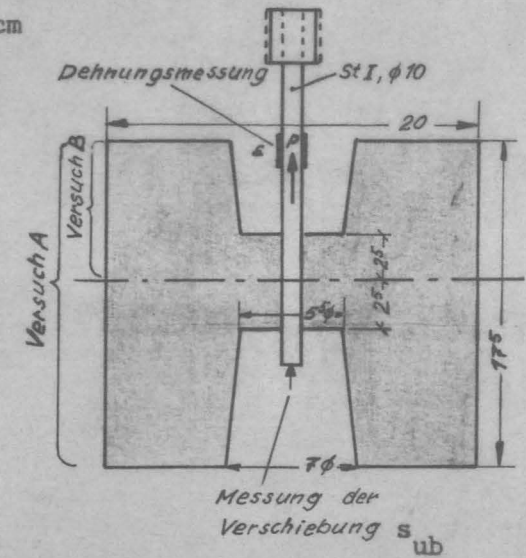
- a.) Kraft  $P$  : 1 Mp / 4,65 cm
- b.) Dehnung  $\epsilon$  : 0,1% / 0,55 cm  $\approx$  1 Mp/3,33 cm
- c.) Verschiebung  $\delta$  : 1 mm / 5,4 cm
- d.) Zeit  $t$  : 10 ms / 1 cm

1.2

Verbundlänge  $l_v = 25 \text{ mm}$  $\delta = 0$ 

Maßstäbe:

- a.) Kraft  $P$  : 1 Mp / 5 cm
- b.) Dehnung  $\epsilon$  : 0,1% / 0,9 cm
- c.) Verschiebung  $\delta$  : 1 mm / 3,1 cm
- d.) Zeit  $t$  : 10 ms / 1 cm

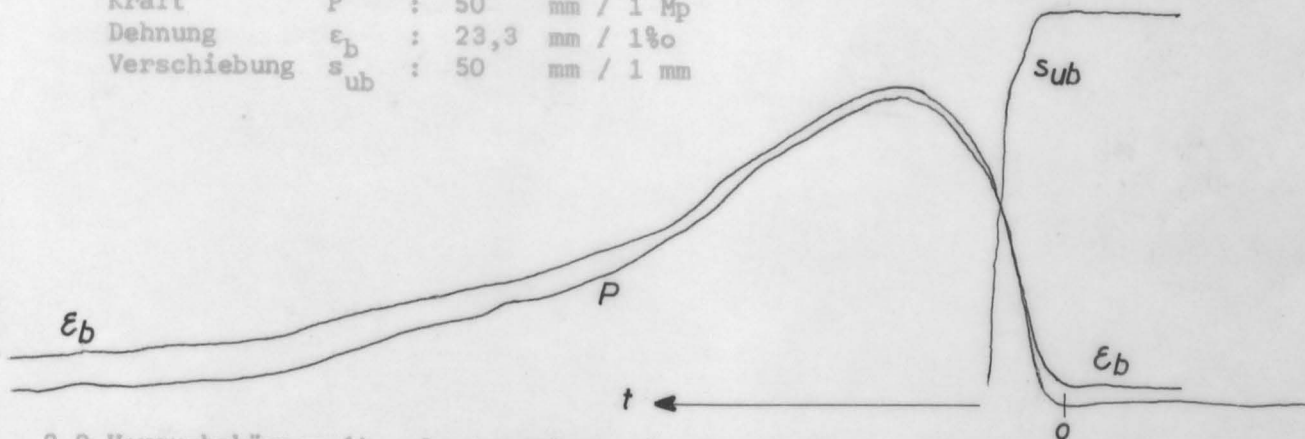


Beispiele für Kraft-, Weg-Zeitfunktionen

Bewehrungsstäbe: Stahl I,  $\phi 10 \text{ mm}$ Lastanstiegszeit  $t_0 < 1 \text{ ms}$  - Sollkraft 1 Mp

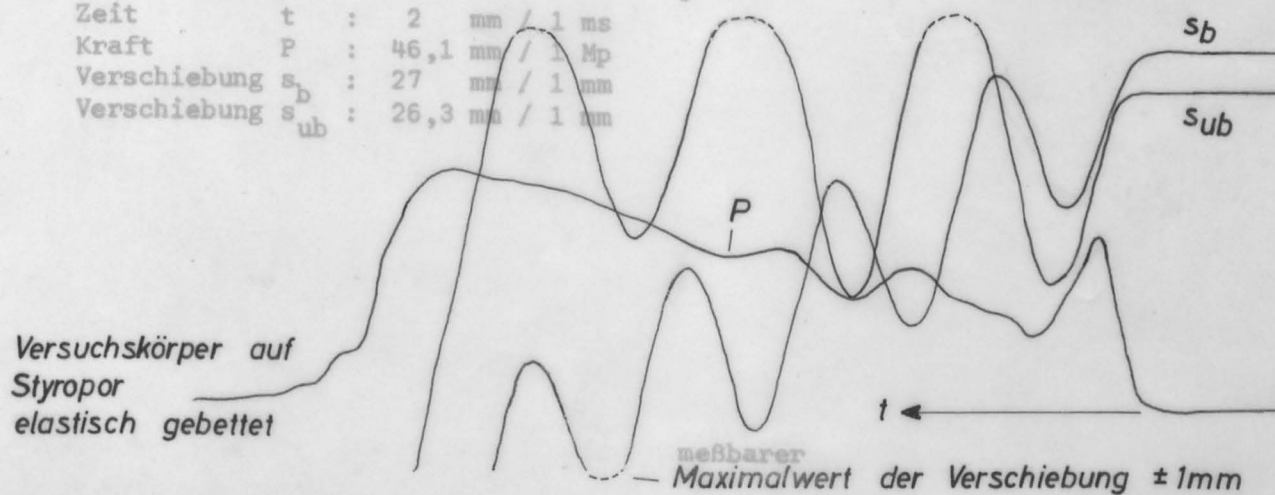
2.1 Versuchskörper 10 - Lastanstiegszeit  $t_0 < 1 \text{ ms}$  - Sollkraft 1 Mp

Zeit	$t$	:	2	mm / 1 ms
Kraft	$P$	:	50	mm / 1 Mp
Dehnung	$\epsilon_b$	:	23,3	mm / 1‰
Verschiebung	$s_{ub}$	:	50	mm / 1 mm



2.2 Versuchskörper 14 - Lastanstiegszeit  $t_0 = 1,67 \text{ ms}$  - Sollkraft 1 Mp

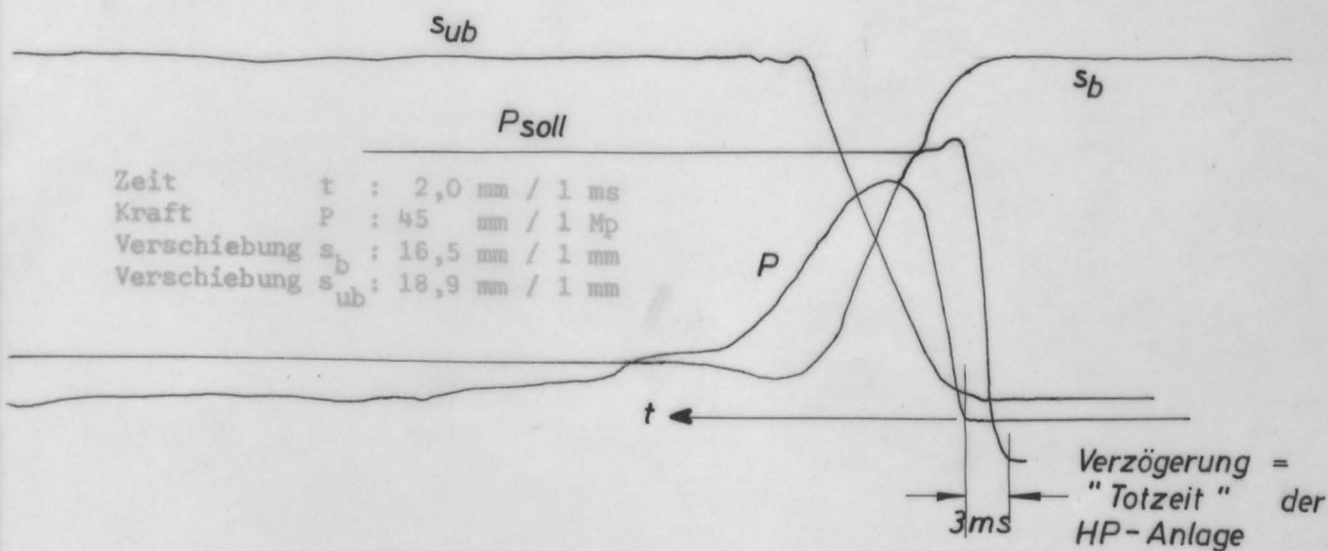
Zeit	$t$	:	2	mm / 1 ms
Kraft	$P$	:	46,1	mm / 1 Mp
Verschiebung	$s_b$	:	27	mm / 1 mm
Verschiebung	$s_{ub}$	:	26,3	mm / 1 mm



Versuchskörper auf  
Styropor  
elastisch gebettet

2.3 Versuchskörper 11 - Lastanstiegszeit  $t_0 = 1,67 \text{ ms}$  - Sollkraft 1 Mp

Zeit	$t$	:	2,0	mm / 1 ms
Kraft	$P$	:	45	mm / 1 Mp
Verschiebung	$s_b$	:	16,5	mm / 1 mm
Verschiebung	$s_{ub}$	:	18,9	mm / 1 mm



Beispiele für Kraft-, Weg-Zeitfunktionen

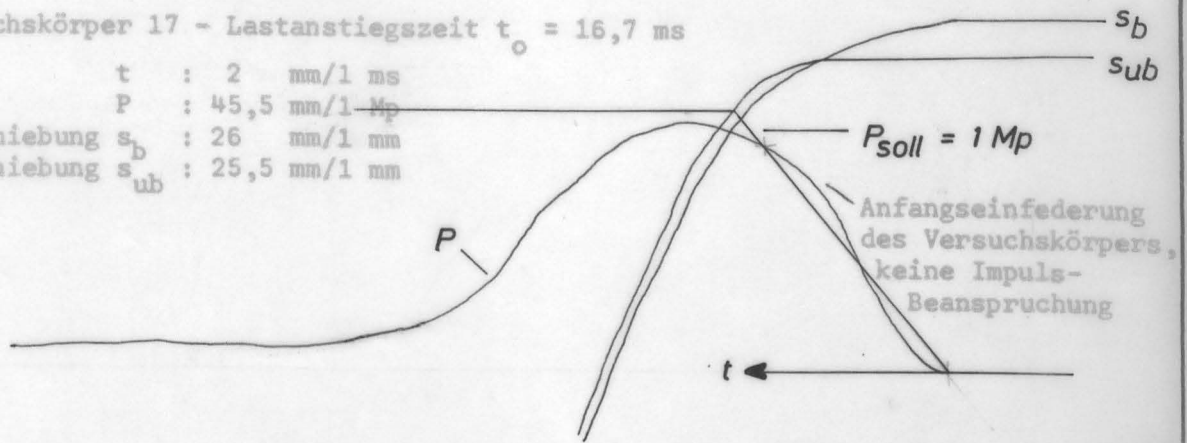
Bewehrungsstäbe: Stahl IVb,  $\varnothing 5,85 \text{ mm}$

- 2.1 quasistatische Beanspruchung - Betonalter 7 Tage
- 2.2 ballistische Beanspruchung - Betonalter 80 Tage
- 2.3 quasistatische Beanspruchung - Betonalter 80 Tage

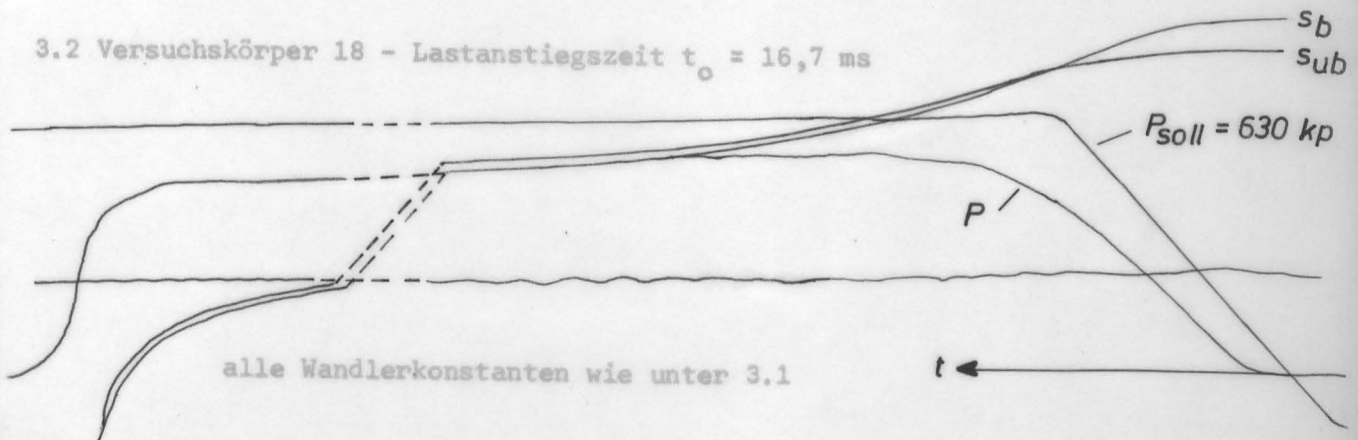
# Beispiele für Kraft-, Weg-Zeitfunktionen

## 3.1 Versuchskörper 17 - Lastanstiegszeit $t_o = 16,7 \text{ ms}$

Zeit  $t$  : 2 mm/1 ms  
 Kraft  $P$  : 45,5 mm/1 Mp  
 Verschiebung  $s_b$  : 26 mm/1 mm  
 Verschiebung  $s_{ub}$  : 25,5 mm/1 mm

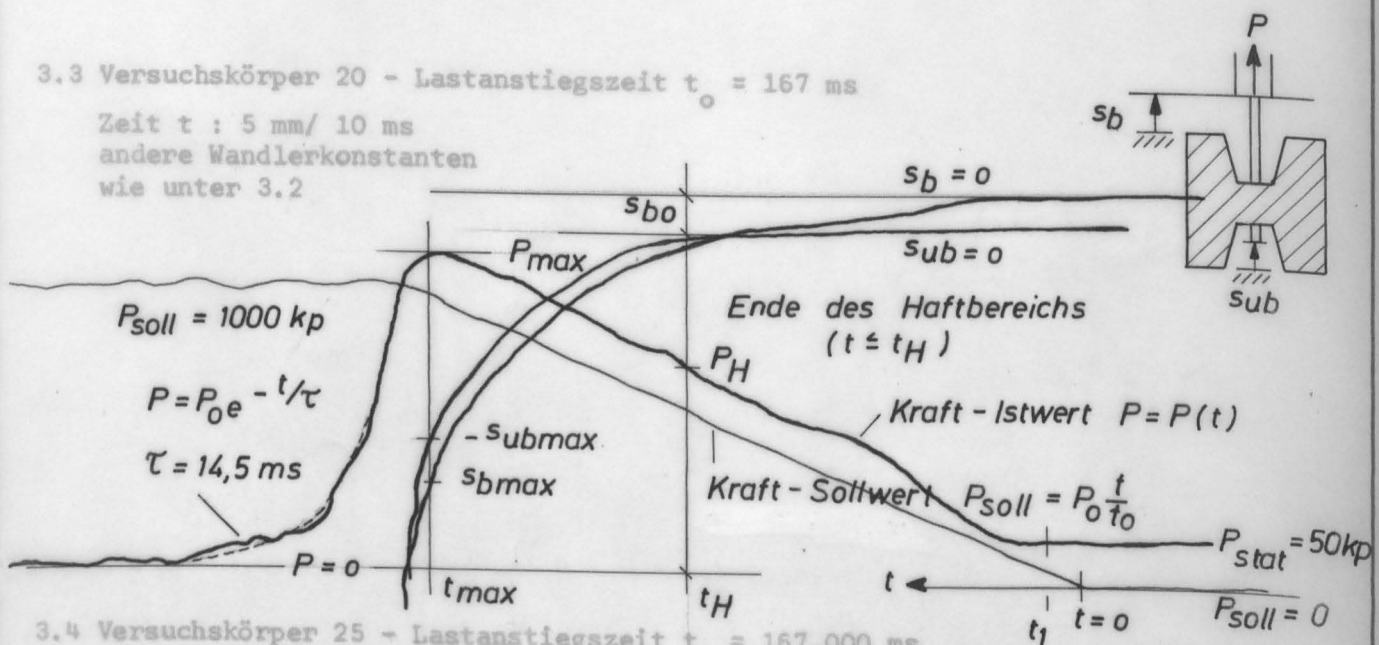


## 3.2 Versuchskörper 18 - Lastanstiegszeit $t_o = 16,7 \text{ ms}$

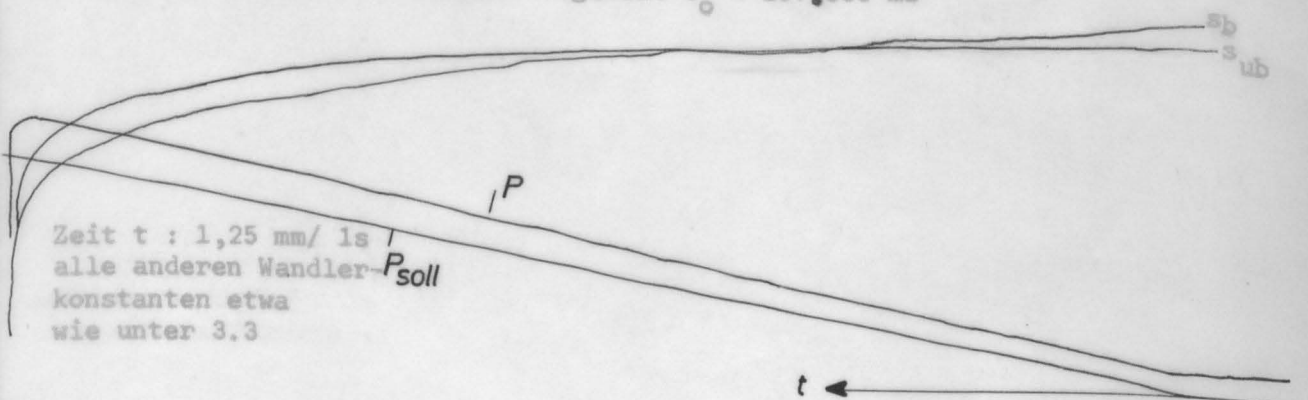


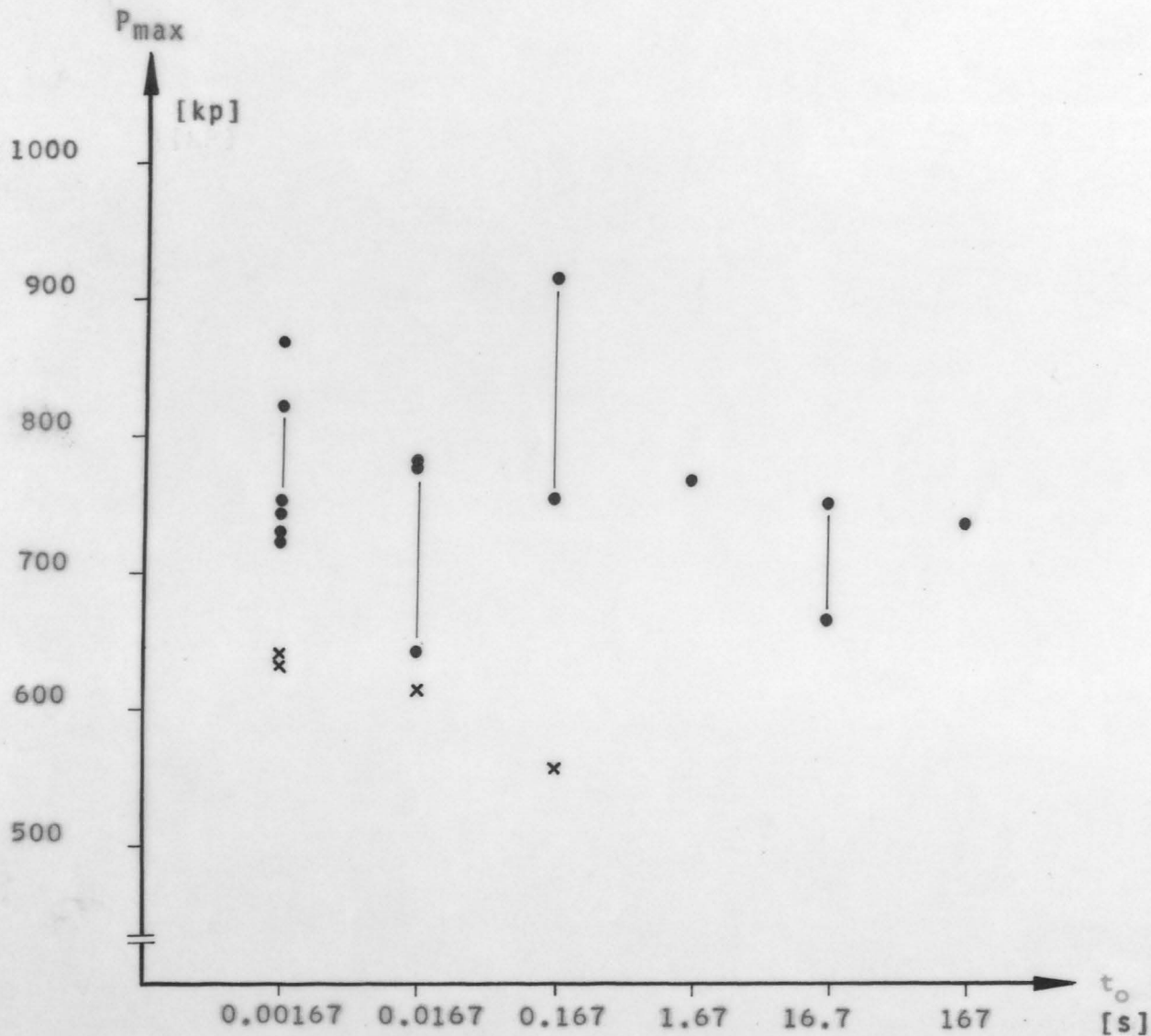
## 3.3 Versuchskörper 20 - Lastanstiegszeit $t_o = 167 \text{ ms}$

Zeit  $t$  : 5 mm/ 10 ms  
 andere Wandlerkonstanten  
 wie unter 3.2



## 3.4 Versuchskörper 25 - Lastanstiegszeit $t_o = 167,000 \text{ ms}$





$P_{\max}$ : Während des Ausziehvorganges gemessener Maximalwert der Kraft, s. Tab. 1, Sp. 4.

$t_0$ : Sollkraft-Anstiegszeit, s. Tab. 1, Sp. 2.

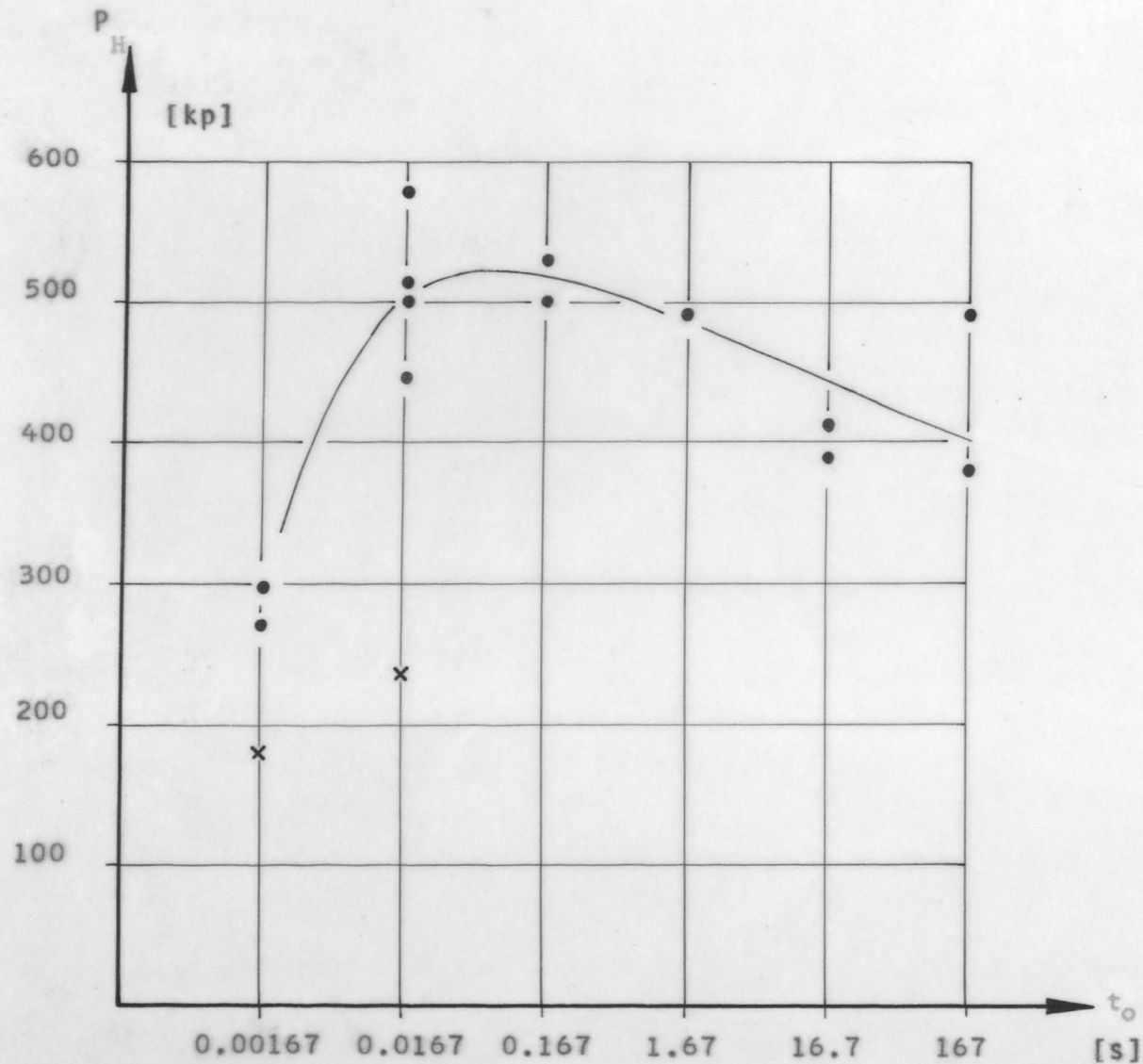
Die Verbundlänge beträgt einheitlich  $l_V = 35$  mm

• Stahl IVb,  $\varnothing 5,85$  mm

× Stahl I,  $\varnothing 10$  mm

Maximallast als Funktion der Kraft-Anstiegszeit





$P_H$  : Kraft, bei der am unbelasteten Ende der Bewehrungsstäbe erstmals eine Verschiebung registriert wird, s. Tab. 1, Sp. 7.

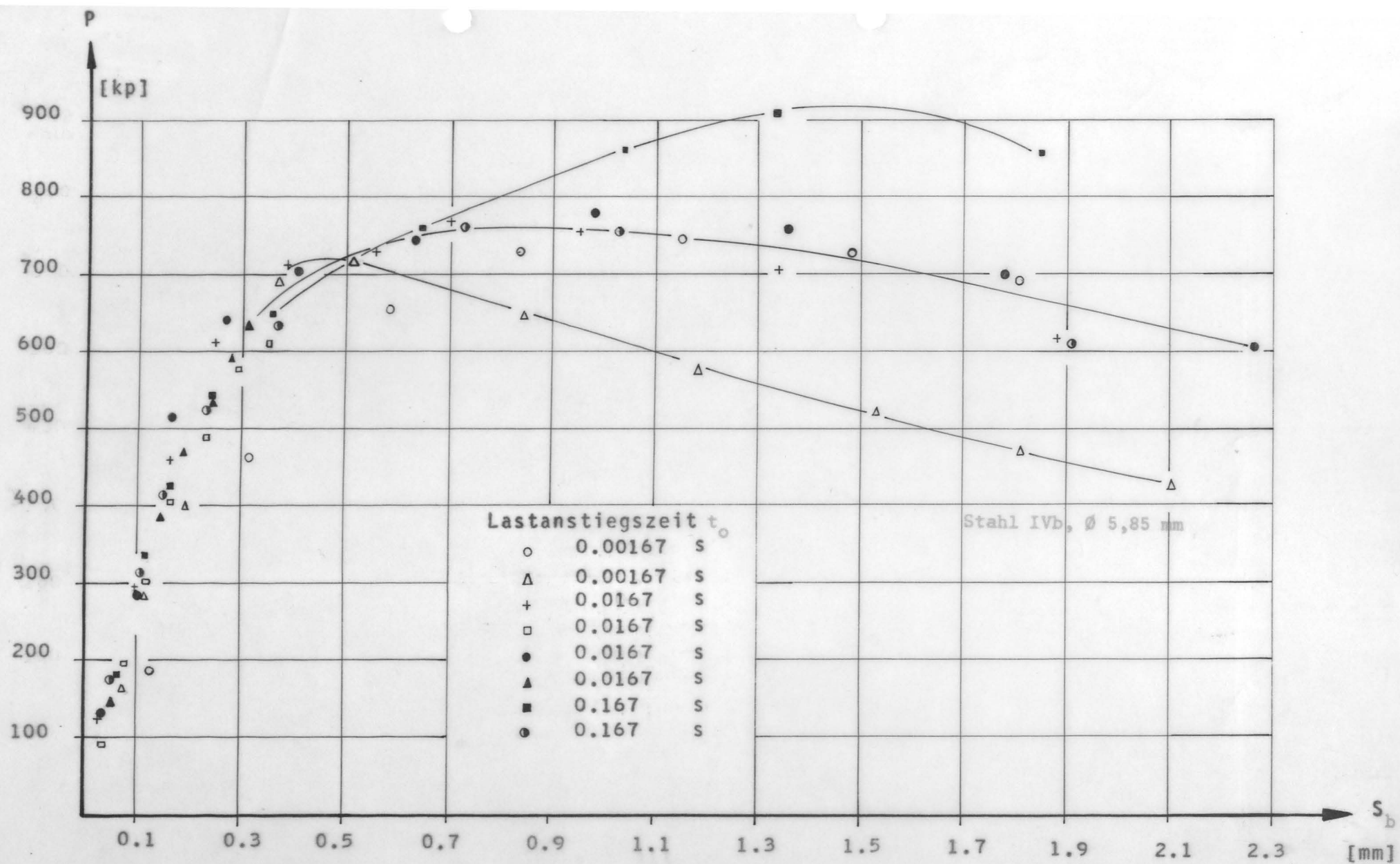
$t_0$  : Sollkraft - Anstiegszeit, s. Tab. 1, Sp. 2

Die Verbundlänge beträgt einheitlich  $l_V = 35$  mm

- Stahl IVb,  $\varnothing 5,85$  mm
- x Stahl I,  $\varnothing 10$  mm

Maximale Haftlast als Funktion der Kraft-Anstiegszeit

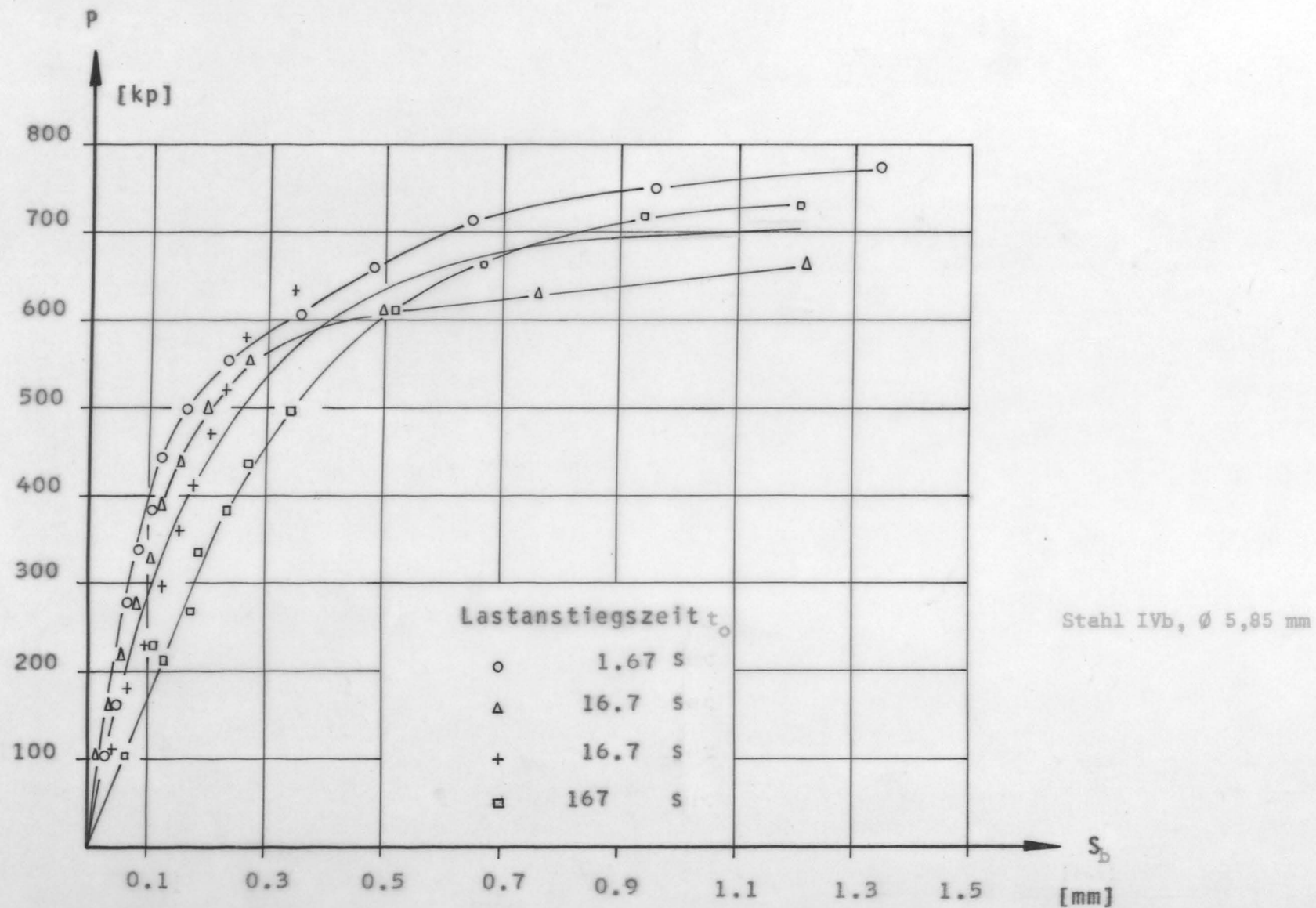
Anlage 7



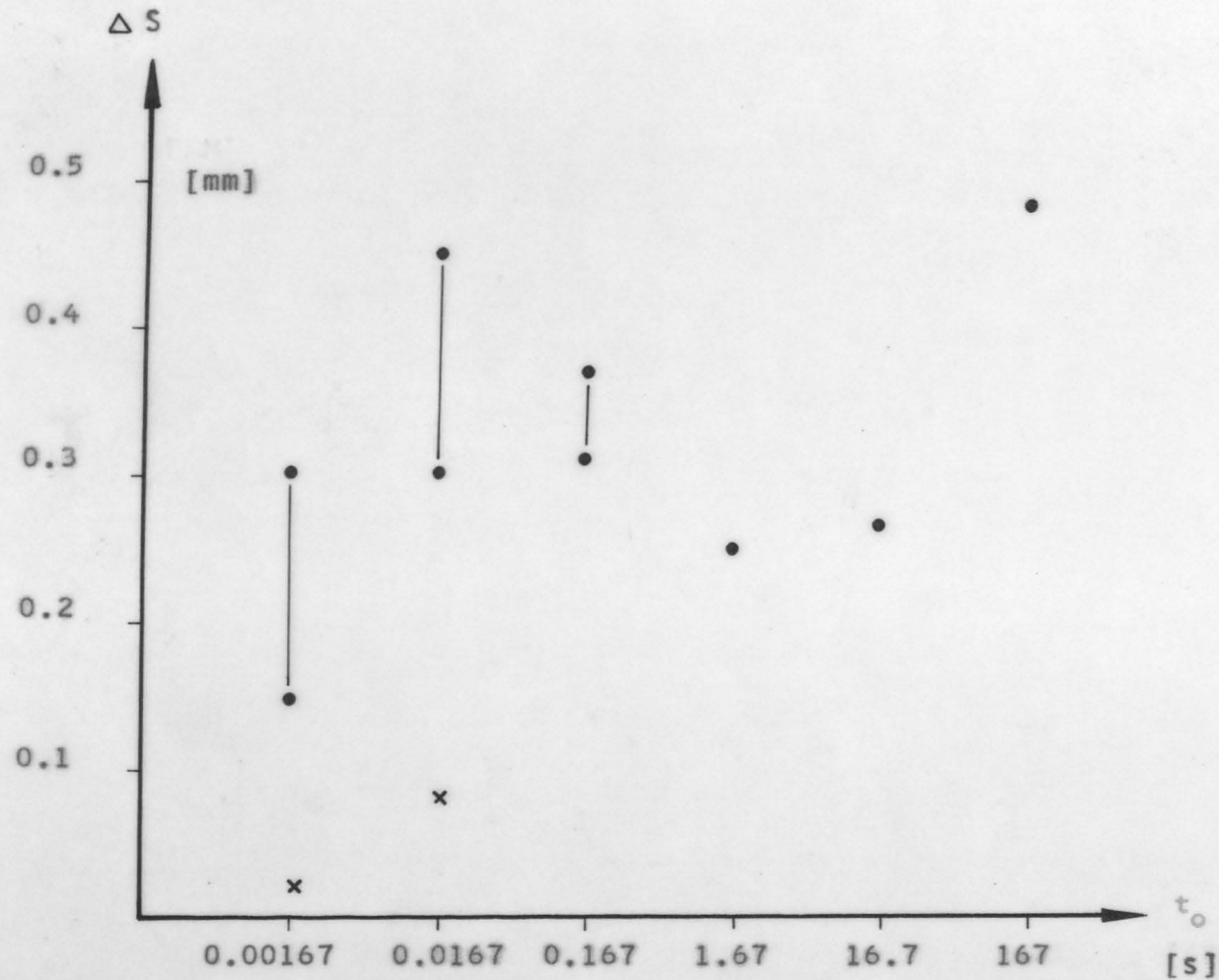
P-s - Diagramm,  $t_0 < 1$  s

(Parameter: Kraft-Anstiegszeit)

Anlage 8



P-s - Diagramm,  $t_0 > 1$  s  
(Parameter: Kraft-Anstiegszeit)



$\Delta s$  : Differenz der Verschiebungen am belasteten  $s_b$  und unbelastetem  $s_{ub}$   
 Stabende = Verlängerung des Bewehrungsstabes zwischen den Meßstellen

$t_0$  : Sollkraft - Anstiegszeit,  
 s. Tab. 1, Spalte 2

Die Verbundlänge beträgt  $l_V = 35$  mm

• Stahl IVb,  $\varnothing 5,85$  mm  
 x Stahl I,  $\varnothing 10$  mm

Maximale Stahlverlängerung als Funktion der Kraft-Anstiegszeit



## Verbundverhalten von Betonstählen bei Kurzzeitbeanspruchung

### Betr.: Versuchsprogramm 1970 - 1. Versuchsserie

Folgende Ausziehversuche sind in der ersten Versuchsserie geplant:

1. Eigenfrequenz der Versuchsanordnung:  $f \approx 20 \text{ Hz}$ ;  $\omega \approx 125 \text{ s}^{-1}$   
Einstellung der Eigenfrequenz durch weichfedernde Beilagen
2. Belastungsform: 15 Variationen (2.1.1 bis 2.3.5)

Statische Belastung, vor und nach dem Stoß, mit 80% der bei vorgegebener Verbundlänge zulässigen statischen Spannung  $\sigma_{\text{zul}}$ ; zusätzlich dynamische Belastung durch einen überlagerten Dreieck-Impuls veränderlicher Impulsdauer und Impulshöhe.

Impuls-Anstiegszeit ( $= \frac{1}{2}$  Impulsdauer)  $t_0 = 3,2; 8; 20 \text{ ms}$ ,

d. h. 2.1	$\omega t_{01} = 125 \cdot 3,2 = 0,4 < 1 \text{ (a)}$
2.2	$\omega t_{02} = 125 \cdot 8 = 1 \text{ (b)}$
2.3	$\omega t_{03} = 125 \cdot 20 = 2,5 > 1 \text{ (c)}$

Es wird somit eine impulsartige (a), eine quasistatische (c) und eine im Übergangsbereich befindliche (b) Belastung angestrebt.

#### Impulshöhe (Variationen der Sollwert-Kraftspitze)

2.1.1 bis 2.3.1 : Lastspitze > Traglast

Die Vorversuche haben gezeigt, daß damit die maximal aufnehmbare Last  $P_{\text{max}}$  in etwa abgeschätzt werden kann

2.1.2 bis 2.3.2 : Lastspitze =  $P_{\text{max}}$

Diese Belastung wird vermutlich nur über kurze Zeit vom Versuchskörper aufgenommen werden können. Je nach Standzeit wird  $P_{\text{max}}$  reduziert auf  $P_d \text{ zul}$ , d.i. die gesuchte Last für einen einmaligen Impuls vorgegebener Einwirkungsdauer  $t_0$

2.1.3 bis 2.1.5 : Lastspitze =  $P_d \text{ zul}$

2.2.3 bis 2.2.5 : 3 Versuche unter gleichen Bedingungen zur groben

2.3.3 bis 2.3.5 : Erfassung der Streuung.  $P_d \text{ zul}$  soll als erreicht gelten, wenn die statische Belastung nach vorangegangener Kurzzeitbeanspruchung mindestens 1 Stunde getragen wird. Um "stille Reserven" des Systems zu vermeiden, soll der Versuchskörper anschließend mit konstanter Geschwindigkeit, etwa 1 Mp/min, bis zum Versagen belastet werden.

Anlage 11a

zum Bericht St/Rö vom 1.4.1970

### 3. Versuchskörper: 13 Variationen (3.1.1 bis 3.3.3)

Die Variationen erstrecken sich auf

#### 3.1 Stahlart

3.1.1 : Stahl I

3.1.2 : Stahl I, gerippt - Sonderwalzung  
der Hüttenwerke Rheinhausen

3.1.3 : Stahl III b

#### 3.2 Stabdurchmesser

3.2.1 8 mm

3.2.2 16 mm

3.2.3 26 mm

#### 3.3 Verbundlänge $l_v$

3.3.1 20 mm

3.3.2  $0,5 l_R$

3.3.3  $l_R$  (= Rißabstand, abhängig von  
Stahlart und Stabdurchmesser)

Folgende Varianten sind vorgesehen:

Stahl	Durchmesser in mm	Verbundlängen in mm
I	8	16
	16	16; $0,5 l_R$ ; $l_R$
	26	26
I, gerippt	16	20; $0,5 l_R$ ; $l_R$
IIIb	8	20
	16	20; $0,5 l_R$ ; $l_R$
	26	20

Für die Betongüte wird zunächst konstant  $B_n$  350 vorgeschlagen.  
Die angegebenen Verbundlängen  $l_v$  sind Richtwerte. Bei Versuchskörpern mit Stahl I soll  $l_v$  ein ganzzahliges Vielfaches des Stabdurchmessers, bei den gerippten Stählen ein ganzzahliges Vielfaches des Rippenabstandes betragen.

Anlage 11b

zum Bericht St/Rö vom 1.4.1970